

การวัดรูปคลื่นกระแสรั่วไหลที่ไม่สมมาตรของกักเก็บเสิร์จอันเนื่องมาจากอิทธิพล  
ของการได้รับกระแสอิมพัลส์แบบต่อเนื่อง

MEASUREMENT OF ASYMMETRICAL LEAKAGE CURRENTS WAVEFORMS OF  
METAL OXIDE SURGE ARRESTER DUE TO MULTIPLE CURRENT IMPULSES



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2564

KMITL-2021-EN-M-020-015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MEASUREMENT OF ASYMMETRICAL LEAKAGE CURRENTS WAVEFORMS OF  
METAL OXIDE SURGE ARRESTER DUE TO MULTIPLE CURRENT IMPULSES



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF MASTER OF  
ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
SCHOOL OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2021  
KMUTL-2021-EN-M-020-015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2021

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวัดรูปคลื่นกระแสรั่วไหลที่ไม่สมมาตรของกัปดักเสิร์จอันเนื่องมาจากอิทธิพลของการได้รับกระแสอิมพัลส์แบบต่อเนื่อง
นักศึกษา	นายชัยธวัช ช่วยอินทร์
รหัสประจำตัว	61601207
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2564
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. อานันท์วัฒน์ คุณากร
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รศ.ดร. นรเศรษฐ์ พัฒนเดช

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งนำเสนอพฤติกรรมของกระแสรั่วไหลของกัปดักเสิร์จที่เกิดความไม่สมมาตรขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของการได้รับกระแสอิมพัลส์แบบต่อเนื่องและผลของขั้วที่ต่างกันของกระแสอิมพัลส์แบบต่อเนื่อง เป็นที่ทราบกันดีว่าการวัดและมอนิเตอร์กระแสรั่วไหลนั้นเป็นวิธีที่ใช้ในการประเมินการเสื่อมอายุของกัปดักเสิร์จที่ถูกใช้งานกันอย่างแพร่หลายทั้งด้านการวิจัยและเชิงพาณิชย์ มากไปกว่านั้นบางงานวิจัยสามารถนำข้อมูลไปวิเคราะห์ต่อยอดเพื่อประเมินอายุของกัปดักเสิร์จที่เชื่อมต่ออยู่ในระบบไฟฟ้า ซึ่งการประเมินและวิเคราะห์ค่ากระแสรั่วไหลดังกล่าวนี้สามารถทำได้หลายรูปแบบด้วยกันทั้งในด้านของการวัดกระแสรั่วไหลรวมในรูปของ RMS การวัดค่ากระแสรั่วไหลความต้านทาน การวัดค่ายอดของกระแสรั่วไหลรวม หรือแม้แต่การวัดกระแสรั่วไหลในรูปแบบของฮาร์มอนิกที่สามของกระแส วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ให้ข้อสังเกตเกี่ยวกับการวัดกระแสรั่วไหลในลักษณะที่เกิดความไม่สมมาตรขึ้น โดยความไม่สมมาตรของกระแสรั่วไหลสามารถเกิดได้เมื่อกัปดักเสิร์จได้รับกระแสอิมพัลส์แบบต่อเนื่อง ดังนั้นการประเมินสภาพของกัปดักเสิร์จจากกระแสรั่วโดยที่ไม่พิจารณาถึงความสมมาตรของรูปคลื่นกระแสนั้น อาจจะนำไปสู่ความผิดพลาดของการวิเคราะห์นั้น ๆ ได้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วยการศึกษาทดลองทั้งหมด 2 การทดลองด้วยกัน ได้แก่ การทดลองเพื่อศึกษาผลของความไม่สมมาตรของรูปคลื่นกระแสรั่วไหลความต้านทานเนื่องจากการได้รับกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบต่อเนื่อง และการทดลองเพื่อศึกษาผลของความไม่สมมาตรของรูปคลื่นกระแสรั่วไหลความต้านทานเนื่องจากการได้รับกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบต่อเนื่องที่มีผลของขั้วกระแสเข้ามาเกี่ยวข้อง

<b>Thesis</b>	MEASUREMENT OF ASYMMETRICAL LEAKAGE CURRENTS WAVEFORMS OF METAL OXIDE SURGE ARRESTER DUE TO MULTIPLE CURRENT IMPULSES
<b>Student</b>	Mr.Chaitawat Chuayin
<b>Student ID.</b>	61601207
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2021
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr. Anantawat Kunakorn
<b>Thesis Co-advisor</b>	Assoc.Prof.Dr. Norasage Pattanadech

## ABSTRACT

This thesis focuses on the asymmetric leakage current of surge arrester caused by the multiple impulses current and the different polarities of the impulse current. It is well known that the leakage current measurement and monitoring is a widely used estimating the surge arrester degradation for both research and commercial use. In addition, some studies have been able to further estimate the age of surge arrester. The measurement and analysis of leakage currents can be done in various ways e.g., measurement the total leakage current in term of RMS, measurement of resistive leakage current, measurement of the peak value of total leakage current or even measurement of the leakage current in term of the third harmonic current. This thesis provides observations on the leakage current measurement of asymmetrical behavior. The asymmetrical behavior can be occurred when a surge arrester is stressed by multiple impulse currents. Therefore, the condition assessment of the surge arrester using leakage current measurement without considering the symmetry of the waveform may lead to improper diagnosis. This thesis consists of two experiments i.e., study of asymmetry of the leakage current waveform due to the multiple lightning impulse current and study the effect of asymmetrical leakage current waveform due to multiple lightning impulse current with the effect of impulse polarities.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความรู้จากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. อานันท์วัฒน์ คุณากร และ รศ.ดร. นรเศรษฐ์ พัฒนเดช ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง และกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณนายสุทัศน์ สุขสกุลปัญญา และนายชนาธิป จำนง (กองทดสอบไฟฟ้าแรงสูง ฝ่ายบริหารจัดการสินทรัพย์ระบบส่ง, การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย) ที่อำนวยความสะดวกด้านการห้องปฏิบัติการทดสอบ ตลอดจนคำปรึกษาและแนวทางการทดสอบ

ขอขอบคุณ นายMatthieu Zinck ผู้บริหารบริษัทพาราเล็ค เอ็นเนอร์จี้ จำกัด (Paralec Energy Co., Ltd) ที่ให้การสนับสนุนทั้งทางด้านคุณทรัพย์ของทุนวิจัยและจัดหาตัวอย่างทดสอบ ตลอดจนการเสนอแนวคิดเพิ่มเติมในงานวิจัยทำให้งานวิจัยชิ้นนี้ออกมาสมบูรณ์เป็นประโยชน์ทั้งในด้านการศึกษาวิจัยต่อยอดและนำไปปรับปรุงประยุกต์ในเชิงพาณิชย์

ขอขอบคุณน้อง ๆ ในห้องปฏิบัติการไดกาแลป (Dika Lab) ทุกคน ที่ช่วยเหลือในด้านการทดสอบ บางหัวข้อ และช่วยจัดเตรียมตัวอย่างทดสอบ

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ชัยวัช ช้วยอินทร์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
บทที่ 2.....	6
2.1 ประวัติศาสตร์ของฟ้าผ่า.....	6
2.2 พฤติกรรมของฟ้าผ่า.....	6
2.3 การเกิดฟ้าผ่า.....	8
2.4 การเกิดฟ้าผ่าซ้ำ (Multiple strike).....	9
2.5 ชั่วของกระแสฟ้าผ่า.....	11
2.6 อุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้า: กับดีกฟ้าผ่า.....	13
2.6.1 อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกิน.....	15
2.6.2 รูปแบบและโครงสร้างของกับดีกฟ้าผ่าชนิด ZnO.....	17
2.6.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าและความร้อนของ ZnO.....	19

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.3 การเสื่อมสภาพและอายุของอุปกรณ์กับดักเสิร์จ .....	21
2.7 กระแสรั่วไหลของกับดักเสิร์จชนิดไม่มีแก๊ส .....	23
บทที่ 3 .....	27
3.1 ตัวอย่างทดสอบ .....	27
3.2 วงจรจ่ายกระแสอิมพัลส์ (Residual voltage test circuit) .....	29
3.3 วงจรวัดกระแสรั่วความต้านทาน (Reference voltage measurement circuit) .....	30
3.3 การวัดอุณหภูมิของกับดักเสิร์จ .....	32
3.4 รายละเอียดและกระบวนการทดลอง .....	32
3.4.1 การทดลองที่ 1 .....	32
3.4.2 การทดลองที่ 2 .....	35
บทที่ 4 .....	39
4.1 ผลการทดลองที่ 1 .....	39
4.2 ผลการทดลองที่ 2 .....	48
บทที่ 5 .....	73
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	73
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	75
บรรณานุกรมหรือเอกสารอ้างอิง .....	76
ภาคผนวก .....	80
ภาคผนวก ก .....	81
ภาคผนวก ข .....	83
ภาคผนวก ค .....	85
ประวัติผู้เขียน .....	98

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	แผนการดำเนินงาน ..... 3
2.1	ตารางแสดงจำนวนครั้งของการเกิดฟ้าผ่า(ชั่วลบ) ที่ได้รับการบันทึกสถิติและจำนวนครั้งของการเกิดฟ้าผ่าลำเดี่ยว..... 7
2.2	ตารางแสดงจำนวนครั้งของการเกิดฟ้าผ่า(ชั่วลบ) ที่ได้รับการบันทึกสถิติและจำนวนครั้งของการเกิดฟ้าผ่าลำเดี่ยว..... 9
2.3	คุณสมบัติของวิธีการวัดกระแสรั่วไหลความต้านทานในแต่ละวิธี..... 26
3.1	รายละเอียดคุณสมบัติของกัปดักเสิร์จผู้ผลิตที่ 1 สำหรับการทดลองที่ 1..... 27
3.2	รายละเอียดคุณสมบัติของกัปดักเสิร์จผู้ผลิตที่ 2 สำหรับการทดลองที่ 2..... 28
3.3	ข้อมูลอ้างอิงสำหรับตัวอย่างทดสอบกับดักเสิร์จผู้ผลิตที่ 2 ..... 35
4.1	รูปคลื่นแรงดันคงเหลือและกระแสดิซชาร์จที่ทำการบันทึกของตัวอย่างทดสอบที่ 1.1 และ 1.2 หลังจากได้รับกระแสอิมพัลส์ต่อเนื่องชั่วบวกจำนวน 10 ครั้ง..... 39
4.2	ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ถูกทำการวัดของตัวอย่างทดสอบที่ 1.1 และ 1.2 หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าต่อเนื่องชั่วบวกจำนวน 10 ครั้ง..... 41
4.3	ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ถูกทำการวัดของตัวอย่างทดสอบที่ 1.1 และ 1.2 หลังจากถูกวางทิ้งไว้ให้เย็นตัวลงตามธรรมชาติเป็นเวลา 1 วัน..... 42
4.4	รูปคลื่นแรงดันคงเหลือและกระแสดิซชาร์จที่ทำการบันทึกของตัวอย่างทดสอบที่ 1.1 และ 1.2 หลังจากได้รับกระแสอิมพัลส์ต่อเนื่องชั่วลบจำนวน 5 ครั้ง..... 43
4.5	ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ถูกทำการวัดของตัวอย่างทดสอบที่ 1.1 และ 1.2 หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสอิมพัลส์ต่อเนื่องชั่วลบ ..... 47
4.6	รูปคลื่นแรงดันคงเหลือและกระแสดิซชาร์จที่ทำการบันทึกของตัวอย่างทดสอบที่ 2.1 ถึง 2.4 หลังจากได้รับกระแสอิมพัลส์ต่อเนื่องจำนวน 5 ครั้ง (ครั้งที่ 1) ..... 48
4.7	ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ถูกทำการวัดของตัวอย่างทดสอบที่ 2.1 - 2.4 หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสอิมพัลส์ต่อเนื่องจำนวน 5 ครั้ง (ครั้งที่ 1)..... 51
4.8	รูปคลื่นแรงดันคงเหลือและกระแสดิซชาร์จที่ทำการบันทึกของตัวอย่างทดสอบที่ 2.1 ถึง 2.4 หลังจากได้รับกระแสอิมพัลส์ต่อเนื่องจำนวน 5 ครั้ง (ครั้งที่ 2) ..... 54

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.9	ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ถูกทำการวัดของตัวอย่างทดสอบที่ 2.1 - 2.4 หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสिमพัลส์ต่อเนื่องจำนวน 5 ครั้ง (ครั้งที่ 2)..... 56
4.10	รูปคลื่นแรงดันคงเหลือและกระแสดิซชาร์จ์ที่ทำการบันทึกของตัวอย่างทดสอบที่ 2.1 ถึง 2.4 หลังจากได้รับกระแสिमพัลส์ต่อเนื่องจำนวน 5 ครั้ง (ครั้งที่ 3) ..... 58
4.11	ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ถูกทำการวัดของตัวอย่างทดสอบที่ 2.1 - 2.4 หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสिमพัลส์ต่อเนื่องจำนวน 5 ครั้ง (ครั้งที่ 3)..... 60
4.12	รูปคลื่นแรงดันคงเหลือและกระแสดิซชาร์จ์ที่ทำการบันทึกของตัวอย่างทดสอบที่ 2.1 ถึง 2.4 หลังจากได้รับกระแสिमพัลส์ต่อเนื่องจำนวน 5 ครั้ง (ครั้งที่ 4) ..... 612
4.13	ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ถูกทำการวัดของตัวอย่างทดสอบที่ 2.1 - 2.4 หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสिमพัลส์ต่อเนื่องจำนวน 5 ครั้ง (ครั้งที่ 4)..... 615
4.14	รูปคลื่นแรงดันคงเหลือและกระแสดิซชาร์จ์ที่ทำการบันทึกของตัวอย่างทดสอบที่ 2.1 ถึง 2.4 หลังจากได้รับกระแสिमพัลส์ต่อเนื่องจำนวน 5 ครั้ง (ครั้งที่ 5) ..... 67
4.15	ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ถูกทำการวัดของตัวอย่างทดสอบที่ 2.1 - 2.4 หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสिमพัลส์ต่อเนื่องจำนวน 5 ครั้ง(ครั้งที่ 5)..... 69

## สารบัญญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ภาพถ่ายของลำฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นด้วยกล้องความเร็วสูง 7,207 ภาพต่อวินาที ซึ่งถูกบันทึกโดย ZT Research.....8
2.2	กระบวนการการเกิดฟ้าผ่าซ้ำ ..... 11
2.3	เครื่องนับจำนวนครั้งฟ้าผ่าที่ถูกประกอบสร้างและใช้งาน (a) และวงจรที่ใช้ ในการประกอบสร้าง (b) ..... 13
2.4	กราฟแสดงคุณลักษณะของกั๊บดักเสิร์จระหว่างกระแสและแรงดัน ..... 14
2.5	หลักการทํางานของอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินที่แตกต่างกัน ..... 16
2.6	โครงสร้างของสปาร์กแก๊บที่มีขายกันในปัจจุบัน ขนาด 100kA สำหรับแรงดัน 350 V ..... 16
2.7	โครงสร้างของกั๊บดักเสิร์จชนิดมีแก๊บ (a), กั๊บดักเสิร์จชนิดมีแก๊บที่ใช้งาน(b) และตัวต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น SiC ..... 17
2.8	โครงสร้างของกั๊บดักเสิร์จชนิดไม่มีแก๊บ (a), กั๊บดักเสิร์จชนิดไม่มีแก๊บที่ใช้งาน(b) และตัวต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น ZnO..... 18
2.9	โครงสร้างของกั๊บดักเสิร์จชนิดไม่มีแก๊บที่ใช้ในทางการค้า ..... 18
2.10	โครงสร้างด้านผลึกของกั๊บZnOในรูปแผนภาพ(a) และที่ถูกส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์(b)..... 19
2.11	เส้นกราฟแสดงเสถียรภาพทางอุณหภูมิของกั๊บดักเสิร์จ ..... 20
2.14	องค์ประกอบของกระแสรั่วไหลรวมของกั๊บดักเสิร์จ(a) และ ลำดับขององค์ประกอบ ของฮาร์โมนิกที่ผสมอยู่ (b)..... 23
2.16	องค์ประกอบของกระแสรั่วไหลของกั๊บดักเสิร์จ ..... 25
3.1	กั๊บดักเสิร์จการค้าที่ถูกใช้เป็นตัวอย่งทดสอบสำหรับการทดลองที่ 1(a) และ การทดลองที่ 2(b)..... 28
3.2	วงจรทดสอบสำหรับป้อนกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นมาตรฐาน 8/20 $\mu$ s..... 29
3.3	วงจรทดสอบกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า ..... 30
3.4	วงจรทดสอบสำหรับวัดกระแสรั่วไหลความต้านทาน..... 31
3.5	อุปกรณ์บริดจ์ที่ใช้ในการทดสอบ(a) และวงจรสมมูลภายใน(b)ซึ่งแสดงถึง อิมพีแดนซ์ปรับค่าได้ ..... 31

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6 ตำแหน่งของกัปดักเสิร์จกั๋วค้อนหภูมิ.....	32
3.7 รูปคลื่นกระแสความต้านทานของกัปดักเสิร์จตัวอย่างที่1 สำหรับแรงดันที่ 21kV(a) และแรงดันที่ 1mA(b).....	33
3.8 รูปคลื่นกระแสความต้านทานของกัปดักเสิร์จตัวอย่างที่2 สำหรับแรงดันที่ 21kV(a) และแรงดันที่ 1mA(b).....	34
3.9 รูปคลื่นกระแสความต้านทานของกัปดักเสิร์จตัวอย่างที่2.1 สำหรับแรงดันที่ 24kV(a) และแรงดันที่ 1mA(b).....	36
3.10 รูปคลื่นกระแสความต้านทานของกัปดักเสิร์จตัวอย่างที่2.3 สำหรับแรงดันที่ 24kV(a) และแรงดันที่ 1mA(b).....	36
4.1 รูปคลื่นกระแสความต้านทานของกัปดักเสิร์จตัวอย่างที่1.1 สำหรับแรงดันที่ 21 kV(a) และแรงดันที่ 1mA(b) หลังจากถูกกั๋นด้วยกระแสอิมพัลส์ต่อเนื่องชั่วววกจำนวน 10 ครั้ง.....	41
4.2 รูปคลื่นกระแสความต้านทานของกัปดักเสิร์จตัวอย่างที่1.2 สำหรับแรงดันที่ 21 kV(a) และแรงดันที่ 1mA(b) หลังจากถูกกั๋นด้วยกระแสอิมพัลส์ต่อเนื่องชั่วววกจำนวน 10 ครั้ง.....	42
4.3 กั๋ดักเสิร์จตัวอย่างทดสอบที่ 1.1ที่เกิดการระเบิดหลังจากป้อนกระแสอิมพัลส์ต่อเนื่อง ชั่ววบกได้ 2 ครั้ง(a) และตำแหน่งที่เกิดการระเบิดออก(b).....	44
4.4 วงจรวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน(Partial discharge measurement circuit).....	45
4.5 แรงดันเริ่มการของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของตัวอย่างทดสอบที่ 1.1.....	46
4.6 การเกิดดิสชาร์จบางส่วนของตัวอย่างทดสอบที่ 1.1 ที่แรงดัน 18.54 kV.....	46
4.7 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลตัวอย่างที่1.1 สำหรับแรงดันที่แรงดันที่ 1mA โดยแสดงกระแส รั่วไหลรวม(a) และกระแสรั่วไหลความต้านทาน(b) หลังจากถูกป้อนด้วยกระแส อิมพัลส์ชั่ววบกจำนวน 2 ครั้ง.....	47
4.8 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลความต้านทานของตัวอย่างทดลองที่1.2 สำหรับแรงดันที่แรงดัน ที่ 1mA(a) และแรงดันที่ 21 kV(b) หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสอิมพัลส์ชั่ววบกจำนวน 5 ครั้ง ...	48
4.9 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลความต้านทานของตัวอย่างทดลองที่2.1 สำหรับแรงดันที่แรงดัน ที่ 1mA(a) และแรงดันที่ 24 kV(b) หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสอิมพัลส์ชั่ววบกจำนวน 5 ครั้ง .	52
4.11 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลความต้านทานของตัวอย่างทดลองที่2.3 สำหรับแรงดันที่แรงดัน ที่ 1mA(a) และแรงดันที่ 24 kV(b) หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสอิมพัลส์ชั่ววบกจำนวน 5 ครั้ง ...	52

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลความต้านทานของตัวอย่างทดลองที่2.4 สำหรับแรงดันที่แรงดันที่ 1mA(a) และแรงดันที่ 24 kV(b) หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสอิมพัลส์ชั่วเวลาจำนวน 5 ครั้ง ...	53
4.13 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลความต้านทานของตัวอย่างทดลองที่2.1 สำหรับแรงดันที่แรงดันที่ 1mA(a) และแรงดันที่ 24 kV(b) หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสอิมพัลส์ชั่วเวลาจำนวน 5 ครั้ง ...	57
4.14 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลความต้านทานของตัวอย่างทดลองที่2.2 สำหรับแรงดันที่แรงดันที่ 1mA(a) และแรงดันที่ 24 kV(b) หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสอิมพัลส์ชั่วเวลาจำนวน 5 ครั้ง ...	57
4.15 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลความต้านทานของตัวอย่างทดลองที่2.3 สำหรับแรงดันที่แรงดันที่ 1mA(a) และแรงดันที่ 24 kV(b) หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสอิมพัลส์ชั่วเวลาจำนวน 5 ครั้ง .	57
4.16 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลความต้านทานของตัวอย่างทดลองที่2.4 สำหรับแรงดันที่แรงดันที่ 1mA(a) และแรงดันที่ 24 kV(b) หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสอิมพัลส์ชั่วเวลาจำนวน 5 ครั้ง .	58
4.17 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลความต้านทานของตัวอย่างทดลองที่2.1 สำหรับแรงดันที่แรงดันที่ 1mA(a) และแรงดันที่ 24 kV(b) หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสอิมพัลส์ชั่วเวลาจำนวน 5 ครั้ง .....	61
4.18 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลความต้านทานของตัวอย่างทดลองที่2.2 สำหรับแรงดันที่แรงดันที่ 1mA(a) และแรงดันที่ 24 kV(b) หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสอิมพัลส์ชั่วเวลาจำนวน 5 ครั้ง .....	62
4.19 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลความต้านทานของตัวอย่างทดลองที่2.3 สำหรับแรงดันที่แรงดันที่ 1mA (a) และแรงดันที่ 24 kV(b) หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสอิมพัลส์ชั่วเวลาจำนวน 5 ครั้ง .....	62
4.20 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลความต้านทานของตัวอย่างทดลองที่2.4 สำหรับแรงดันที่แรงดันที่ 1mA (a) และแรงดันที่ 24 kV(b) หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสอิมพัลส์ชั่วเวลาจำนวน 5 ครั้ง .....	62
4.21 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลความต้านทานของตัวอย่างทดลองที่2.1 สำหรับแรงดันที่แรงดันที่ 1mA (a) และแรงดันที่ 24 kV(b) หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสอิมพัลส์ชั่วเวลาจำนวน 5 ครั้ง .....	66
4.22 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลความต้านทานของตัวอย่างทดลองที่2.2 สำหรับแรงดันที่แรงดันที่ 1mA (a) และแรงดันที่ 24 kV(b) หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสอิมพัลส์ชั่วเวลาจำนวน 5 ครั้ง .....	67

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.23 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลความต้านทานของตัวอย่างทดลองที่2.3 สำหรับแรงดันที่แรงดันที่ 1mA (a) และแรงดันที่ 24 kV(b) หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสอิมพัลส์ชั่ววอกจำนวน 5 ครั้ง .....	67
4.24 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลความต้านทานของตัวอย่างทดลองที่2.4 สำหรับแรงดันที่แรงดันที่ 1mA (a) และแรงดันที่ 24 kV(b) หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสอิมพัลส์ชั่ววอกจำนวน 5 ครั้ง .....	67
4.25 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลความต้านทานของตัวอย่างทดลองที่2.1 สำหรับแรงดันที่แรงดันที่ 1mA (a) และแรงดันที่ 24 kV(b) หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสอิมพัลส์ชั่ววอกจำนวน 5 ครั้ง .....	71
4.26 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลความต้านทานของตัวอย่างทดลองที่2.2 สำหรับแรงดันที่แรงดันที่ 1mA (a) และแรงดันที่ 24 kV(b) หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสอิมพัลส์ชั่ววอกจำนวน 5 ครั้ง .....	71
4.27 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลความต้านทานของตัวอย่างทดลองที่2.3 สำหรับแรงดันที่แรงดันที่ 1mA (a) และแรงดันที่ 24 kV(b) หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสอิมพัลส์ชั่ววอกจำนวน 5 ครั้ง .....	71
4.28 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลความต้านทานของตัวอย่างทดลองที่2.4 สำหรับแรงดันที่แรงดันที่ 1mA (a) และแรงดันที่ 24 kV(b) หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสอิมพัลส์ชั่ววอกจำนวน 5 ครั้ง .....	72

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงอันประกอบไปด้วยระบบจำหน่ายไฟฟ้า (Distribution system) และระบบส่งจ่ายไฟฟ้า (Transmission system) นั้นประกอบไปด้วยอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงมากมายและล้วนแล้วแต่มีราคาที่สูงกว่าที่ค่อนข้างแพง ซึ่งอุปกรณ์ที่ถูกติดตั้งเข้ากับระบบดังกล่าวมีโอกาสที่จะได้รับแรงดันเกินอยู่ตลอดเวลา แรงดันเกินเหล่านี้จะทำให้การฉนวนเกิดการล้มเหลวหรืออุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงเหล่านั้นเกิดความเสียหายรุนแรงได้ และอาจรวมไปถึงความขัดข้องของระบบไฟฟ้า (Disruption) ตามมา เพื่อป้องกันมิให้เหตุการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้น กัปดักเสิร์จหรือกัปดักฟ้าผ่า (Surge arrester) ซึ่งเป็นหนึ่งในอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้าจึงเป็นสิ่งจำเป็นและถูกนำมาใช้งาน

กัปดักเสิร์จถูกนำมาใช้เพื่อปรับปรุงและเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับระบบส่งจ่ายและจำหน่ายไฟฟ้า โดยกัปดักเสิร์จถูกนำมาต่อขนานเข้ากับอุปกรณ์ที่ต้องการจะป้องกันซึ่งมักจะเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญและมีราคาแพง อาทิเช่น หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง, เครื่องจักรกลไฟฟ้า, อุปกรณ์ไฟฟ้าในสถานีไฟฟ้าย่อย, สายส่งเหนือหัว หรือ จุดต่อระหว่างสายส่งเหนือหัวและสายส่งใต้ดิน (Riser pole) เมื่อมีแรงดันเกินเข้ามาในระบบ กัปดักเสิร์จจะจำกัดขนาดของค่ายอดแรงดันเกินเหล่านั้นไม่ให้เกินค่าที่อุปกรณ์ที่ถูกป้องกันจะสามารถทนได้

ในการใช้งานกัปดักเสิร์จนั้น ตลอดช่วงอายุของอุปกรณ์การเสื่อมสภาพสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งการเสื่อมอายุเนื่องจากผลของความเครียดทางสนามไฟฟ้าที่กระทำ, ความเครียดจากแรงดันเกินหรือกระแสฟ้าผ่าที่กัปดักเสิร์จได้รับ ตลอดจนความชื้นที่ซึมผ่านฉนวนภายนอก หากกัปดักเสิร์จเกิดการชำรุดหรือเสียหายก็จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพและความสามารถในการป้องกันอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบ ทั้งนี้การตรวจสอบการเสื่อมสภาพของกัปดักเสิร์จจึงสำคัญและจำเป็น

วิธีหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายของการตรวจวัดการเสื่อมสภาพของกัปดักเสิร์จคือการวัดกระแสรั่วที่ไหลผ่านกัปดักเสิร์จผ่านทางสายดินที่ต่ออยู่ เพื่อกัปดักเสิร์จเกิดการเสื่อมสภาพค่ายอดของกระแสรั่วที่ถูกวัดได้จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามความเสื่อมสภาพ องค์ประกอบของกระแสรั่วของกัปดักเสิร์จนั้นประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ องค์ประกอบของความต้านทาน และองค์ประกอบของตัวเก็บประจุ โดยค่าตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดในการบ่งบอกการเสื่อมสภาพคือกระแสรั่วความต้านทาน แต่อย่างไรก็ตามการวัดกระแสรั่วความต้านทานนั้นสามารถทำได้ยากในทางปฏิบัติ เนื่องจากผลกระทบทางด้านสัญญาณรบกวนและปัจจัยภายนอกอื่นๆ การวัดค่ากระแสรั่วในปัจจุบันจึงถูกทดแทนด้วยการวัดกระแสรั่วในรูปของRMS

(Root mean square) ด้วยการใช้ค่าเฉลี่ยของรูปคลื่นของกระแสรั่วไหลจึงส่งผลถึงค่าของขนาดของกระแสที่ถูกต้องแสดงผลด้วยเช่นกัน จากงานวิจัยของ Bok-Hee Lee และ Sung-Man Kang ได้กล่าวถึงพฤติกรรมของกระแสรั่วไหลที่เกิดความไม่สมมาตรเมื่อได้รับอิทธิพลจากการได้รับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าแบบต่อเนื่อง (multiple lightning impulse voltages) [1, 2, 3]

ในงานวิจัยนี้จึงศึกษารูปคลื่นของกระแสรั่วไหลที่เกิดจากผลของกับดักเสิร์จที่ได้รับกระแสฟ้าผ่าแบบต่อเนื่อง (multiple lightning impulse current) และผลของขั้วของกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า ดังที่ได้กล่าวมาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงถูกจัดทำขึ้นเพื่อนำเสนอปัญหาและสาเหตุของการเกิดความไม่สมมาตรของกระแสรั่วไหลของกับดักเสิร์จ

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

จุดมุ่งหมายของการศึกษานี้ประกอบไปด้วย 4 วัตถุประสงค์ ดังนี้

1. เพื่อศึกษาผลของกระแสฟ้าผ่าแบบต่อเนื่องที่มีต่อรูปคลื่นกระแสรั่วไหลความต้านทานของกับดักเสิร์จ
2. เพื่อศึกษาผลของชนิดขั้วกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่มีต่อกระแสรั่วไหลความต้านทานของกับดักเสิร์จ
3. เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของกับดักเสิร์จอันเนื่องมาจากผลของกระแสอิมพัลส์
4. เพื่อนำเสนอข้อจำกัดของการวัดค่าความเสื่อมสภาพของกับดักเสิร์จด้วยการวัดกระแสรั่วแบบ RMS และแบบฮาร์มอนิกที่ 3

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

การศึกษากการเสื่อมสภาพของกับดักเสิร์จในงานวิจัยนี้ด้วยการวัดกระแสความต้านทานนั้นถูกจัดขึ้นภายใต้เงื่อนไขการวิจัยดังนี้

1. ผลของการเสื่อมสภาพของกับดักเสิร์จนั้นถูกทำภายใต้รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มาตรฐาน 8/20  $\mu$ s
2. ชนิดของขั้วของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์นั้นประกอบไปด้วย ชนิดขั้วบวก และขั้วลบ
3. การวัดค่ากระแสรั่วไหลความต้านทานถูกทำด้วยวิธีการนำกระแสรั่วรวมลบด้วยกระแสรั่วตัวเก็บประจุ
4. การวัดค่ากระแสรั่วไหลความต้านทานนั้นถูกทำภายใต้สภาวะเงื่อนไขห้องทดสอบ

## 1.4 สมมุติฐานของการศึกษา

รูปคลื่นกระแสรั่วที่มีพฤติกรรมแบบไม่สมมาตรของกับดักเสิร์จนั้นเกิดขึ้นจากการได้รับกระแสอิมพัลส์แบบต่อเนื่อง โดยพฤติกรรมความไม่สมมาตรดังกล่าวนี้้อาจเกิดขึ้นจากการสะสมประจุ (Space

charge) ระหว่างชั้นของแท่งกับดักเสิร์จภายใน และกรณีที่เกิดกับดักเสิร์จที่มีกระแสรั่วไหลที่ไม่สมมาตรได้รับกระแสอิมพัลส์ของขั้วที่ตรงข้ามกันจะสามารถหักล้างผลของความไม่สมมาตรนั้นได้

### 1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาค้นคว้าข้อมูล จากทฤษฎี และงานวิจัยต่าง ๆ ทั้งภายในประเทศและต่างประเทศ โดยระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินงานนั้น ครอบคลุมตั้งแต่ เดือนมีนาคม พ.ศ. 2562 ถึง เดือนตุลาคม พ.ศ. 2563 โดยมีแผนการดำเนินงานดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	ปีการศึกษา 2561 เทอมที่ 2					ปีการศึกษา 2562 เทอมที่ 1				
	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
1. ศึกษาข้อมูล งานวิจัย รวมถึงทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	←→									
2. ศึกษาวิธีการแยกกระแสรั่ว ความต้านทานจากกระแสรั่วรวม				←→						
3. ศึกษาการวัดและวงจรการป้อนกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน				←→						
4. ศึกษาการเกิดรูปคลื่นที่ไม่สมมาตรของกระแสรั่ว						←→				
5. ออกแบบการทดลอง เพื่อศึกษาผลของกระแสอิมพัลส์แบบต่อเนื่องต่อกับดักเสิร์จ								←→		
การดำเนินงาน	ปีการศึกษา 2562 เทอมที่ 2					ปีการศึกษา 2563 เทอมที่ 1				
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
6. จัดทำการทดลองที่ 1	←→									
7. ออกแบบการทดลอง เพื่อศึกษาผลของขั้วของกระแสอิมพัลส์แบบต่อเนื่องต่อกับดักเสิร์จ			←→							

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- งานวิจัยของ Riddhi Ghosh คณะที่ได้นำเสนอการวิเคราะห์กระแสรั่วไหลของลูกถ้วยฉนวน ซึ่งมีความคล้ายคลึงกันกับกระแสรั่วไหลของกัปดักเสิร์จ งานวิจัยฉบับนี้ได้ใช้เทคนิคการวิเคราะห์กระแสส่วนที่เป็นฮาร์มอนิกส์แทนกระแสรั่วไหลความต้านทาน และยังนำเสนอวิธีการจัดการกับความผิดปกติของกระแสรั่วไหลที่วัดได้เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องและแม่นยำมากยิ่งขึ้น [10]

จากการศึกษาข้อมูลพบว่าการวิเคราะห์กระแสรั่วไหลของกัปดักเสิร์จที่เกิดขึ้นนั้นมีโอกาสที่รูปคลื่นของกระแสจะเกิดความไม่สมมาตรขึ้นมาได้เช่นกัน กล่าวคือค่ายอดของกระแสฝั่งบวกและฝั่งลบของกระแสเหล่านั้นจะไม่เท่ากัน โดยมีงานวิจัยบางส่วนที่พบว่าเกิดพฤติกรรมดังกล่าวขึ้น อย่างไรก็ตามก็ยังไม่มีการอธิบายและการศึกษาที่ชัดเจนถึงพฤติกรรมนี้ ยกตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Bok-Hee Lee และ Sung-Man Kang ที่ศึกษาพฤติกรรมการเสื่อมสภาพของกัปดักเสิร์จจากการป้อนแรงดันอิมพัลส์แบบต่อเนื่อง ส่วนหนึ่งของบทสรุปการทดลองได้กล่าวถึงความไม่สมมาตรของกระแสรั่วไหลหลังจากที่กัปดักเสิร์จได้ถูกทำให้เสื่อมสภาพลง โดยกระแสรั่วไหลความต้านทานส่วนที่เป็นฝั่งบวกจะมีค่ามากกว่าส่วนที่เป็นฝั่งลบ และ งานวิจัยของ Tarcicius Haryono และคณะ ได้ทำการศึกษาที่คล้ายกัน โดยมุ่งเน้นถึงพฤติกรรมของกัปดักเสิร์จจากการป้อนกระแสอิมพัลส์แบบต่อเนื่องเป็นหลัก [3, 11-12]

## บทที่ 2

# ความรู้พื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเกิดฟ้าผ่า ขั้วของกระแส/แรงดัน ฟ้าผ่า การเกิดฟ้าผ่าซ้ำหลายครั้ง ชนิด/ส่วนประกอบและหน้าที่ของกั๊บดักเสิร์จ จวบจนปัญหาและวิธีการ บ่งบอกการเสื่อมสภาพของกั๊บดักเสิร์จ

### 2.1 ประวัติศาสตร์ของฟ้าผ่า

ในอดีตการศึกษาฟ้าผ่าเกิดขึ้นและสามารถติดตามได้จากยุคเบนจามินแฟรงคลิน (1706-1790) โดยเบนจามินแฟรงคลินได้สรุปว่าภายในก้อนเมฆนั้นมีประจุไฟฟ้า ในการทดลองหนึ่งเพื่อหาคำตอบเบนจามินยืนบนขาตั้งที่ต่อเข้ากับไฟฟ้า มือหนึ่งของเขาสวมถุงมือเหล็กตัวนำเพื่อให้เกิดการดิสชาร์จประจุ ระหว่างมืออีกข้างหนึ่งกับพื้นดิน โดยการทดลองสามารถสรุปได้ว่าหากก้อนเมฆเกิดการสะสมประจุขึ้น ภายในการสปาร์ก (ประกายไฟ) จะเกิดขึ้นและเกิดการนำไฟฟ้าระหว่างแท่งเหล็กกล้าและพื้นดิน การทดลองนี้ถูกนำมาศึกษาต่อโดย Thomas-François Dalibard (1709-1799) ในการทดลองของเขานั้น สามารถสังเกตได้ถึงประกายไฟที่กระโดดข้ามจากแท่งเหล็กในช่วงที่มีฝนฟ้าคะนอง

ในเดือนมิถุนายนของปี 1752 การทดลองของเบนจามินด้วยการคล้องกุญแจไว้ที่ปลายนิ้ว และ ปลายอีกด้านหนึ่งของเชือกผูกผูกไว้กับพื้นดินซึ่งเชือกนั้นทำจากวัสดุไหม จากนั้นปล่อยให้หัววอลอยขึ้นไป บนฟ้า เมื่อเวลาผ่านไปลมของเส้นเชือกหลวมๆก็คลายออกจากกัน เมื่อเขาได้นำมือเข้าไปใกล้กับกุญแจก็ เกิดประกายไฟระหว่างช่องว่างของมือกับกุญแจ ผลอันเนื่องมาจากฝนที่ตกทำให้เชือกนั้นชุ่มน้ำและ กลายเป็นตัวนำไฟฟ้า การทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าฟ้าผ่าเกิดจากการดิสชาร์จประจุจากฟ้าผ่าสถิตย์ของ ก้อนเมฆนั่นเอง

### 2.2 พฤติกรรมของฟ้าผ่า

ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าลงดินคือการเกิดดิสชาร์จทางไฟฟ้าในบรรยากาศไม่ว่าจะเป็นระหว่างก้อนเมฆ ด้วยกันเองและก้อนเมฆกับพื้นดิน โดยอาจจะประกอบไปด้วยลำฟ้าผ่า 1 ลำหรือหลายลำก็ได้ ฟ้าผ่าโดย ส่วนใหญ่จะประกอบด้วยฟ้าผ่าหลายลำ โดยลำอื่น ๆ นอกเหนือจากลำแรก (Main stroke) จะถูกเรียกรวมว่าลำย่อย (Subsequence stroke) ในโบรชัวร์ของ Cigre' หมายเลข 549 ได้ให้ตารางสถิติการเก็บ ข้อมูลสะสมเปรียบเทียบระหว่างจำนวนลำฟ้าผ่าเฉลี่ยของฟ้าผ่าชั่วลบและจำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลำเดียว (Single-Stroke Flashes) ซึ่งถูกแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 มากไปกว่านั้นในการเกิดวาบฟ้าผ่า 1 ครั้งจะมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเป็นไปได้ที่ฟ้าจะผ่าลงตำแหน่งที่ต่างกันโดยเฉลี่ยแล้วฟ้าผ่า 1 ครั้ง จะมีความเป็นไปได้ที่ฟ้าผ่าล่านั้น จะผ่าลง 1.6-1.7 จุด และระยะของสองจุดที่แตกต่างกันอาจจะเป็นไปได้ตั้งแต่หลักร้อยเมตรหรือหลาย กิโลเมตรเช่นกัน สำหรับเหตุผลประกอบของปรากฏการณ์นี้ได้ถูกอธิบายอยู่ใน Cigre' 549 เช่นกัน [13]

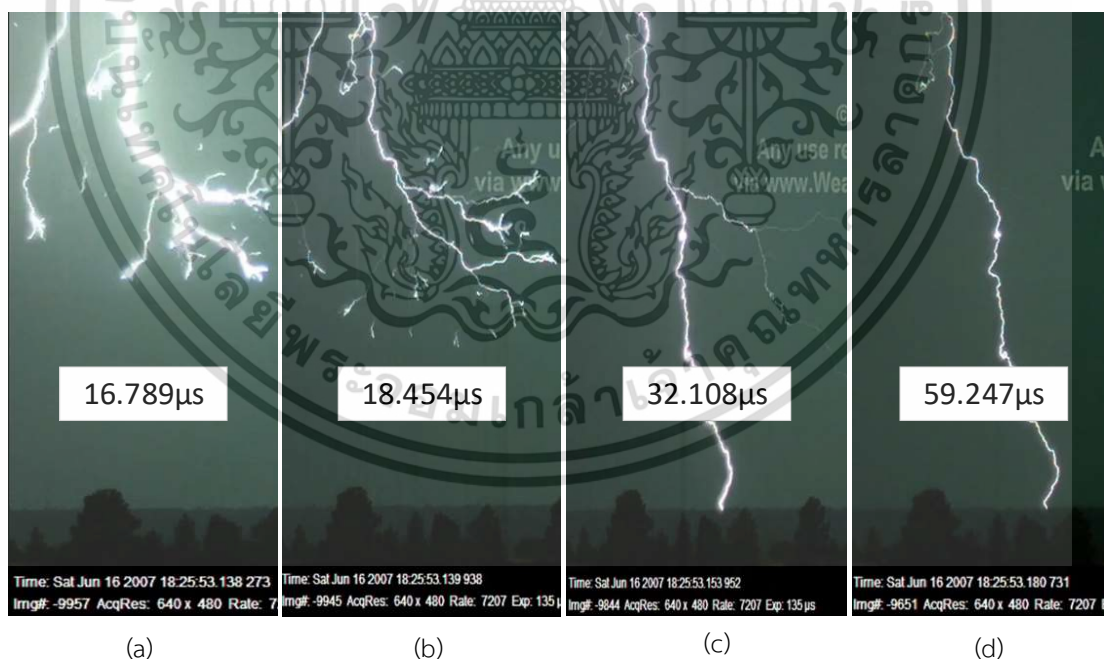
**ตารางที่ 2.1** แสดงจำนวนครั้งของการเกิดวาวฟ้าผ่าที่ผ่าลงตำแหน่งที่แตกต่างกันต่อลำฟ้าผ่า 1 ลำที่ได้รับ การบันทึกสถิติและจำนวนครั้งไว้ตามสถานที่แต่ละแห่ง [13]

สถานที่ (อ้างอิง)	จำนวนจุดที่ฟ้าผ่าลง เฉลี่ยต่อฟ้าผ่า 1 ลำ	เปอร์เซ็นต์ของจำนวนครั้งที่เกิด ลำฟ้าผ่าผ่าลงมากกว่า 1 จุด	จำนวนตัวอย่างที่เก็บ ข้อมูล
New Mexico (Kitagawa et al., 1962)	1.7	49%	72
Florida (Rakov and Uman, 1990b)	1.7	50%	76
France (Berger et al., 1996; Hermant, 2000)	1.5	34%	2995
Arizona (Valine and Krider, 2002)	1.4	35%	386
US Central Great Plains Fleenor et al. (2009)	1.6	33%	103
Brazil (Saraiva et al., 2010)	1.7	51%	138
Arizona (Saraiva et al., 2010)	1.7	48%	206

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 การเกิดฟ้าผ่า

ฟ้าผ่านั้นสามารถเกิดได้ด้วยกระบวนการ 4 ประเภท ซึ่งได้แก่ การแยกประจุ, การก่อตัวของหัวนำร่อง (Leader), การเกิดดิสชาร์จ และการผ่าซ้ำ (1) เริ่มจากการที่ละอองฝนที่ตกลงมาจะถูกโพลาไรซ์ทางไฟฟ้า และตกลงมาในสนามไฟฟ้าทางธรรมชาติของชั้นบรรยากาศ จากนั้น (2) อนุภาคหยดน้ำหรือน้ำแข็งที่เกิดการชนกันจะสะสมประจุจากการเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิต (3) การกระบวนการก่อตัวนำไฟฟ้า (Leader formation process) ซึ่งถูกนำเสนอโดย Heinz Kasemir (1930-2007) ซึ่งอธิบายถึงประจุไฟฟ้าที่มีปริมาณเท่ากันแต่ขั้วตรงข้ามของก้อนเมฆฝนฟ้าคะนองจะเหนี่ยวนำจนแยกขั้วขึ้นมา ในขณะที่เดียวกันถ้าประจุเกิดการรวมตัวกันและสร้างสนามไฟฟ้ามากพอ ก็จะเกิดการเหนี่ยวนำของประจุที่พื้นดินซึ่งเป็นไปตามการเคลื่อนที่ของประจุภายในก้อนเมฆ และเส้นทางของอากาศเริ่มแตกตัวเป็นไอออนเริ่มต้น จากนั้นเมื่อไอออนดังกล่าวมีมากพอก็ทำให้เกิดการดิสชาร์จตามมาเรียกว่าหัวนำร่อง (Leader) เคลื่อนที่ลงสู่พื้นโลก ในระหว่างทางของลำฟ้าผ่าอาจจะเกิดการแตกเป็นกิ่งของลำฟ้าผ่าได้หลายเส้นทางและเคลื่อนที่ลดระดับลงมาสู่พื้นดินแบบสุ่ม ๆ เรียกว่าหัวนำร่องจังหวะก้าว (Stepped leader) ดังรูปที่ 2.1 โดยลำฟ้าผ่าได้แตกแขนงเป็นกิ่งออกมาและเคลื่อนที่ลงสู่พื้นดิน และเมื่อเวลาผ่านไปการดิสชาร์จของกิ่งบางส่วนได้หายไป



รูปที่ 2.1 ภาพถ่ายของลำฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นด้วยกล้องความเร็วสูง 7,207 ภาพต่อวินาที ซึ่งถูกบันทึกโดย ZT Research [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อหัวนําร่องเคลื่อนที่เข้าใกล้พื้นดิน ประจุขั้วตรงข้ามที่พื้นดินจะยิ่งเพิ่มสนามไฟฟ้าให้กับพื้นดิน และเมื่อสนามไฟฟ้ามีค่ามากพอที่จะพัฒนาเป็นการนำไฟฟ้า พื้นดินจะสร้างประจุขั้วตรงข้ามมารองรับ เรียกว่าสตรีมเมอร์ (Streamer) ในจังหวะเดียวกันถ้าที่เกิดการดีสชาร์จจะร้อนขึ้นและมีกระแสไหลเพิ่มมากขึ้น จากนั้นจะเชื่อมเป็นเส้นทางต่อระหว่างก้อนเมฆและพื้นดินในที่สุด เมื่อหัวนําร่อง 2 หัวเชื่อมต่อเข้าหากันกระแสไฟฟ้าจะไหลเพิ่มขึ้นอย่างมหาศาล จากนั้นบริเวณที่มีประจุไฟฟ้าสูงก็จะถ่ายเทหาบริเวณที่มีประจุไฟฟ้าต่ำกว่านั้นคือก้อนเมฆ เหตุการณ์นี้เรียกว่าฟ้าผ่าย้อนกลับ (Return stroke) ซึ่งเป็นส่วนที่มิแสงจ้าของการเกิดดีสชาร์จฟ้าผ่าผ่านนั่นเอง ดังแสดงในรูปที่ 2.1(d)

ในขณะที่เกิดกระบวนการเกิดดีสชาร์จประจุจะสร้างสนามไฟฟ้าขึ้นมาและเมื่อสนามไฟฟ้ามีค่าความเข้มเพียงพอ จะก่อให้เกิดการดีสชาร์จภายในก้อนเมฆด้วยตนเองเช่นกัน ส่วนของอากาศที่สูญเสียสภาพความเป็นฉนวนจนกลายเป็นช่องดีสชาร์จจะเป็นสื่อในการนำไฟฟ้าสำหรับสร้างไอออนลบและไอออนบวกในโมเลกุลของอากาศที่แตกตัวจะสร้างแรงดึงดูดซึ่งกันและกันเพื่อขับเคลื่อนไปทางทิศตรงข้ามระหว่างการผ่า ทำให้อากาศขยายตัวออกอย่างรวดเร็วและก่อให้เกิดคลื่นกระแทกจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอย่างรวดเร็วกลายเป็นเสียงฟ้าผ่าผ่านนั่นเอง

## 2.4 การเกิดฟ้าผ่าซ้ำ (Multiple strike)

ฟ้าผ่าส่วนมากนั้นจะประกอบไปด้วยลำฟ้าผ่าหลายลำฟ้าผ่าหลายลำมักจะสังเกตเห็นได้ด้วยวีดิโอความเร็วสูงหลายตอน กระบวนการนี้เรียกว่าการผ่าซ้ำ (Re-strike) โดยทั่วไปแล้วการผ่าซ้ำจะประกอบไปด้วยลำฟ้าผ่าประมาณ 3-4 ลำ หรืออาจจะมากกว่านั้น ระยะเวลาห่างแต่ละลำจะห่างกันประมาณ 40-50 ms หรืออาจเป็นไปได้มากที่สุดถึง 100 ms ซึ่งตารางใน Cigre' 549 ได้ให้ข้อมูลที่เก็บทางสถิติของจำนวนที่ฟ้าผ่าซ้ำและตำแหน่งที่ฟ้าผ่าลงแตกต่างกันเอาไว้ดังตารางที่ 2.2 [13]

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงจำนวนครั้งของการเกิดฟ้าผ่า(ซ้ำลบ) ที่ได้รับการบันทึกสถิติและจำนวนครั้งของการเกิดฟ้าผ่าลำเดียว [13]

สถานที่ (อ้างอิง)	จำนวนลำฟ้าผ่าเฉลี่ย ต่อฟ้าผ่า 1 ครั้ง	เปอร์เซ็นต์ของจำนวน ครั้งที่เกิดลำฟ้าผ่าเพียง ครั้งเดียว	จำนวนตัวอย่างที่ เก็บข้อมูล
New Mexico (Kitagawa et al., 1962)	6.4	13%	83
Florida (Rakov and Uman, 1990)	4.6	17%	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

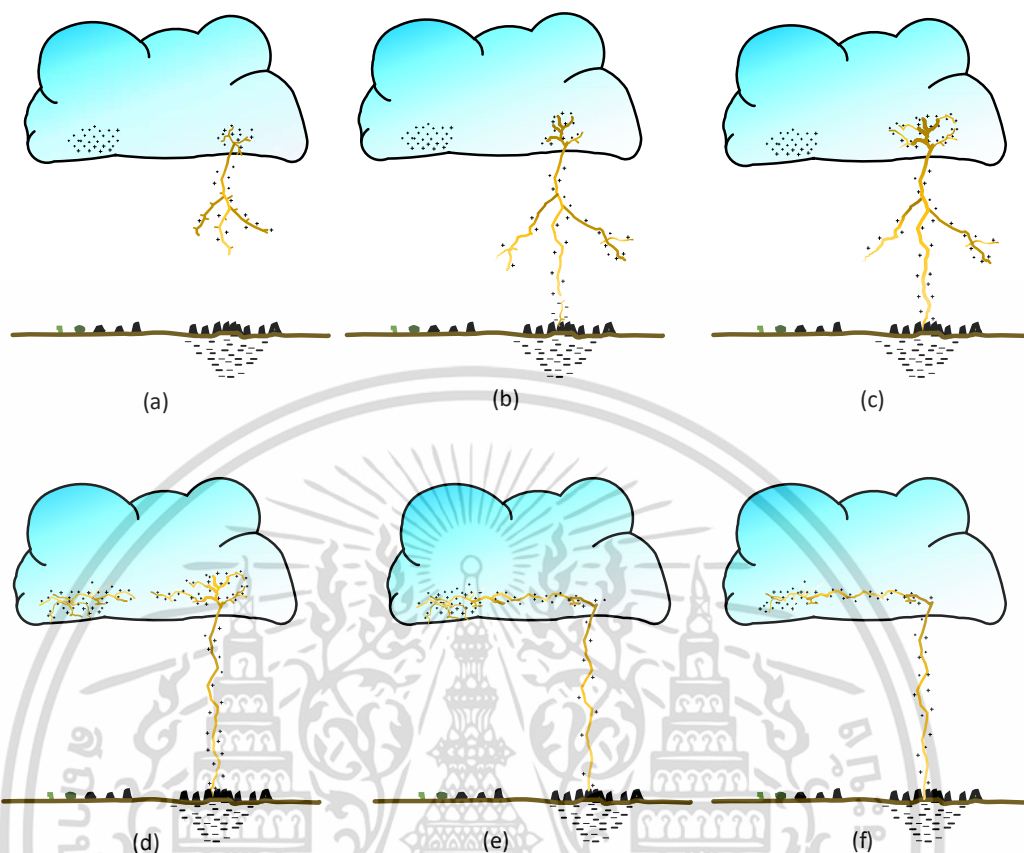
**ตารางที่ 2.2(ต่อ)** ตารางแสดงจำนวนครั้งของการเกิดฟ้าผ่า (ขั้วลบ) ที่ได้รับการบันทึกสถิติและจำนวนครั้งของการเกิดฟ้าผ่าลำเดี่ยว

Sweden (Cooray and Perez, 1994)	3.4	18%	137
Sri Lanka (Cooray and Jayaratne, 1994)	4.5	21%	81
Brazil (Ballarotti et al., 2012)	4.6	17%	883
Arizona (Saraiva et al., 2010)	3.9	19%	209
Malaysia (Baharudin et al., 2012)	4.0	16%	100

การผ่าซ้ำมักจะก่อให้เกิดแสงจ้า (stroke light) ที่เห็นได้ชัดเจน จึงหะการผ่าซ้ำต่อเนื่องแต่ละครั้งจะถูกนำด้วยหัวนาร์รองที่อยู่ระหว่างกลางอีกครั้ง แต่จะมีความแรงน้อยกว่าหัวนาร์รองขั้นต้นโดยปกติแล้วหัวนาร์รองระหว่างกลางดังกล่าวจะใช้ช่องการดิสชาร์จช่องเดียวกับหัวนาร์รองขั้นต้น ซึ่งประจุที่ถูกสะสมอยู่ภายในก้อนเมฆจะลดลงตามจำนวนครั้งที่กระบวนการผ่าเกิดการสำเร็จ ลำฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นสำเร็จจะนำไปสู่เสียงฟ้าร้องจากฟ้าผ่า

เมื่อช่องทางแรกของหัวนาร์รองได้เกิดฟ้าผ่าโดยสมบูรณ์แล้ว อากาศที่สูญเสียสภาพความเป็นฉนวนจะเป็นเส้นทางให้เกิดการถ่ายเทประจุ แต่อากาศเหล่านั้นจะไม่สามารถคืนตัวได้ทันที ประจุส่วนที่ยังคงสะสมอยู่ในก้อนเมฆจึงสามารถเคลื่อนที่ตามลงมาได้อย่างง่าย โดยรูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นลำดับเหตุการณ์ของการเกิดฟ้าผ่าซ้ำที่ถ่ายเทประจุกันระหว่างก้อนเมฆและพื้นดิน

โดยทั่วไปแล้วเราจะนิยามการเกิดฟ้าผ่าซ้ำหลายลำว่า จำนวนของลำฟ้าผ่าต่อการเกิดวาบฟ้าผ่า 1 ครั้ง จากการเก็บสถิติช่วงเวลาระหว่างฟ้าผ่าในแต่ละลำจะห่างกันประมาณ 5-30 ms นอกจากนี้ยังมีความแตกต่างกันระหว่างลำฟ้าผ่าลำแรกและลำฟ้าผ่าซ้ำด้วย เช่น ความไวของฟ้าผ่าซ้ำนั้นจะสูงกว่าฟ้าผ่าลำแรกเนื่องจากฟ้าผ่าลำแรกจำเป็นที่จะต้องสร้างสตรีมเมอร์ (Streamer) หรือร่องดิสชาร์จเพื่อนำไปสู่พื้นดินหรือผิววัตถุ สังเกตได้จากลำฟ้าผ่าลำแรกจะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 32 kA/ $\mu$ s ในขณะที่ความชันของลำฟ้าผ่าซ้ำจะมีค่าสูงถึง 120 kA/ $\mu$ s [15]



รูปที่ 2.2 กระบวนการการเกิดฟ้าผ่าตั้งแต่กระบวนการก่อตัวของกระแส (a), การเกิดหัวนำร่อง(b), การดิสชาร์จ (c), การดิสชาร์จของประจุส่วนที่เหลือ (d) นำมาซึ่งการเกิดฟ้าผ่าซ้ำ (e-f) [16]

## 2.5 ขั้วของกระแสฟ้าผ่า

เดิมทีการศึกษาลักษณะของฟ้าผ่าโดยใช้ขั้วของฟ้าผ่าเป็นเกณฑ์นั้นเกิดขึ้นมานานแล้ว ซึ่งการศึกษานั้นเกี่ยวเนื่องมาจาก 2 เหตุผลคือ

1. การศึกษาภาคสนามชี้ให้เห็นว่ากระแสค่ายอดของกระแสที่สูงที่สุดนั้นเกี่ยวข้องกับฟ้าผ่าขั้วบวก
2. การเปรียบเทียบกับ การสร้างสปาร์คที่ห้องแลปและการจำลองทั่วไปของกลไกการเกิดฟ้าผ่าลงดิน

การสังเกตทั้งสองนี้แสดงให้เห็นว่าการป้องกันเหตุการณ์ฟ้าผ่าจากพฤติกรรมที่เป็นฟ้าผ่าขั้วบวกโดยตรงนั้นบางครั้งอาจจะมีประสิทธิภาพน้อยกว่าการป้องกันจากฟ้าผ่าขั้วลบ ด้วยเหตุผลเดียวกันความน่าจะเป็นที่โครงสร้างนั้น ๆ จะได้รับผลกระทบจากฟ้าผ่าจะลดลงเนื่องจากบริเวณที่ถูกเหนี่ยวนำน้อยกว่า และสิ่งนี้นำไปสู่การประเมินอัตราส่วนของฟ้าผ่าขั้วบวกและขั้วลบในอดีต

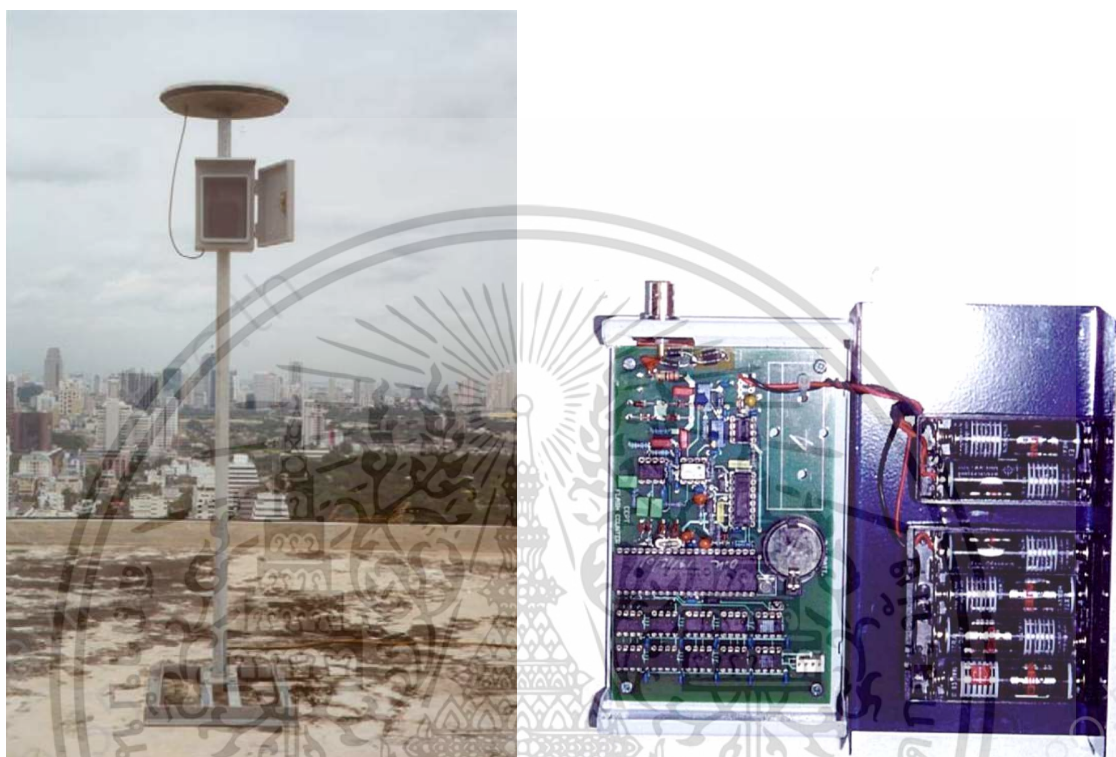
ก่อนที่จะมีการพัฒนาระบบเครือข่ายของการตรวจติดตามฟ้าผ่า ชั่วของฟ้าผ่าสามารถอนุมานได้ แม้ไม่มีการบันทึกค่ากระแสฟ้าผ่าด้วยเทคนิคการตรวจจับคลื่นแม่เหล็กบนสายส่งไฟฟ้าและโครงสร้างต่างๆ หรือจากการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าชั่วคราว ในบริเวณแต่ละพื้นที่ ผลลัพธ์เหล่านี้ชี้ให้เห็นว่า ส่วนน้อยของปรากฏการณ์ฟ้าผ่า (12% เป็นขั้นต่ำ) ที่เป็นชั่วคราว การสังเกตมากกว่า 29 ปีของ Berger ที่ได้ทำการบันทึกค่าและเก็บข้อมูลพบว่าในจำนวน 1,466 ครั้งที่เกิดขึ้นเป็นฟ้าผ่าชั่วลบและ 222 ครั้งเป็นฟ้าผ่าชั่วคราว อีกการยืนยันจาก Fuchs แสดงให้เห็นว่า 95% ของฟ้าผ่านั้นเป็นชั่วลบ นอกจากนี้ยังมีหลักฐานการเก็บข้อมูลของบางพื้นที่สำหรับฟ้าผ่าในฤดูหนาวเช่น ญี่ปุ่นและอเมริกาเหนือ หรือปรากฏการณ์ที่ฟ้าผ่าบริเวณตำแหน่งสูง ๆ ก็มีโอกาที่จะพบปรากฏการณ์ฟ้าผ่าชั่วคราวได้มากกว่า ดังที่กล่าวมานี้แสดงให้เห็นว่าฟ้าผ่าสองชั่วที่เกิดขึ้นจากฟ้าผ่าย้อนกลับ (Return stroke) ต่อเนื่องและเป็นชั่วตรงข้ามไม่ใช่เรื่องแปลกทั้งฟ้าผ่าแบบธรรมชาติและถูกกระตุ้น สิ่งเหล่านี้บ่งบอกถึงส่วนของประจุที่ต่างชนิดกันในพื้นที่ของก้อนเมฆ [17-19]

ในหัวข้อ 2.3 ได้อธิบายถึงปรากฏการณ์การเกิดฟ้าผ่าโดยเริ่มตั้งแต่การสะสมประจุที่อยู่ในก้อนเมฆ นั้นอธิบายถึงสาเหตุของการเกิดชั่วที่แตกต่างกันของกระแสฟ้าผ่าได้เช่นกัน เมื่อประจุบนก้อนเมฆสะสมจนมีความเข้มของสนามไฟฟ้ามากพอก็จะก่อให้เกิดหัวนำร่องเคลื่อนที่ลงมายังพื้นดิน และเหนี่ยวนำประจุชั่วตรงข้ามของพื้นดินให้สร้างสตรีมเมอร์มารองรับและเกิดการดิสชาร์จกันที่สุดในที่สุด เมื่อเส้นทางของอากาศสูญเสียสภาพความเป็นฉนวนก็เกิดการถ่ายเทประจุระหว่างกัน หากประจุบวกถูกถ่ายเทจากก้อนเมฆลงมาถึงพื้นดินก็ถูกเรียกว่ากระแสฟ้าผ่าบวก โดยทั่วไปเหตุการณ์ของฟ้าผ่าชั่วคราวนั้นเกิดขึ้นได้ยากซึ่งอาจจะพบได้ประมาณ 10% ของฟ้าผ่าทั้งหมด อย่างไรก็ตามยังมี 5 สถานการณ์ ที่สามารถพบฟ้าผ่าชั่วคราวได้บ่อย นั่นคือ

1. ระยะการกระจายตัวของพายุฝนฟ้าคะนองใกล้กัน
2. พายุฝนฟ้าคะนองในฤดูหนาว
3. พื้นที่บริเวณฝนฟ้าคะนองส่วนท้ายของชั้นบรรยากาศที่กำลังหมุนตัว
4. พายุที่รุนแรงบางแห่ง
5. พายุฝนฟ้าคะนองที่ก่อตัวขึ้นบนพื้นที่ที่มีไฟป่าหรือควันทึ่มสิ่งเจอปนเยอะ ๆ

จากการศึกษาพบว่าฟ้าผ่าชั่วคราวมักจะประกอบด้วยลำฟ้าผ่าเพียงลำเดียว ในขณะที่ประมาณ 80% ของฟ้าผ่าชั่วลบจะประกอบไปด้วยจำนวนครั้ง 2 หรือมากกว่า นอกจากนี้ในประเทศไทยได้เคยมีการทดลองนับจำนวนครั้งของการฟ้าผ่าเช่นกัน โดยผู้ที่ทำการทดลองคือ ดร.สำรวย สังสะอาดที่ใช้เครื่องนับจำนวนครั้งของการเกิดฟ้าผ่าทำการทดลองที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี 1998 การวิจัยถูกบันทึกผลเป็นระยะเวลา 1 ปี พบว่าจากการบันทึกเหตุการณ์ฟ้าผ่าทั้งหมดจำนวน 5,556

ครั้ง มี 5,326 ครั้งของเหตุการณ์ที่เป็นฟ้าผ่าชั่วลบ ซึ่งคิดเป็น 96% ของทั้งหมด โดยอุปกรณ์ที่ตรวจจับนั้น ถูกสร้างและพัฒนาขึ้นจาก Ciger' และถูกนำมาใช้งานจริง ดังแสดงในรูปที่ 2.3 [20]



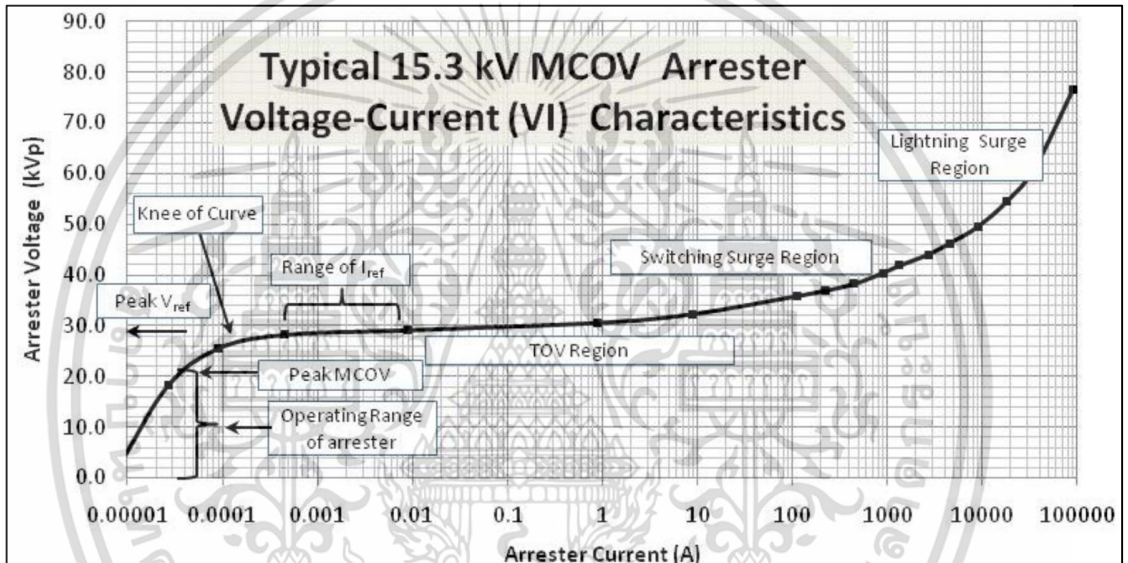
รูปที่ 2.3 เครื่องนับจำนวนครั้งฟ้าผ่าที่ถูกประกอบสร้างและใช้งาน (a) และวงจรเครื่องนับที่ใช้ในการประกอบสร้าง (b) [20]

## 2.6 อุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้า: กับดีกฟ้าผ่า

เนื่องด้วยความต้องการที่เพิ่มมากขึ้นของการใช้พลังงานไฟฟ้า ดังนั้นระบบส่งจ่ายไฟฟ้าหรือระบบจำหน่ายไฟฟ้าจึงมีความสำคัญ เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้าให้การส่งจ่ายพลังงานนั้นเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด เกิดการขัดข้อง (ไฟฟ้าดับ) น้อยที่สุด และยังเป็นที่น่าทึ่งกันว่าอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงนั้นมีราคาที่ย่อมเยาแพง อุปกรณ์ป้องกันจึงถูกพิจารณานำมาใช้งาน หากจะกล่าวถึงอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินของระบบไฟฟ้าเนื่องจากฟ้าผ่า อุปกรณ์กับดีกฟ้าผ่าหรือกับดีกเสิร์จ (Lightning arrester/ Surge arrester) เป็นอุปกรณ์ที่ถูกนำมาใช้งานเพื่อจัดการกับแรงดันเกินที่เกิดขึ้นไม่ว่าจะเป็นแรงดันเกินจากสวิตชิงหรือจากฟ้าผ่าก็ตาม กับดีกเสิร์จถูกนำมาต่อคร่อมกับอุปกรณ์ที่ต้องการจะป้องกัน ซึ่งการทำงานของกับดีกเสิร์จจะต้องทำการประสานสัมพันธ์ร่วมกับความคงทนไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้านั้นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กั้บดักเสีร์จภายในประกอบด้วยตัวต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้นกล่าวคือ ณ ขณะแรงดันใช้งาน (ย่าน operating overvoltage) กั้บดักเสีร์จจะแสดงพฤติกรรมเป็นฉนวนทางไฟฟ้า แต่เมื่อมีแรงดันสูงตกคร่อมตัวมัน (ย่านแรงดันเกินชั่วคราว: TOV, แรงดันเกินจากฟ้าผ่า: lightning overvoltage หรือแรงดันเกินจากสวิตชิง: switching overvoltage) ความต้านทานของกั้บดักเสีร์จจะค่อยๆลดลงและดิสชาร์จแรงดันเกินเหล่านั้นลงสู่กราวด์ ทำให้แรงดันที่ตกคร่อมตัวมันเองและอุปกรณ์ที่ถูกป้องกันลดลงและเพียงพอที่อุปกรณ์นั้นจะสามารถทนได้โดยไม่เกิดความเสียหายขึ้น กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของกั้บดักเสีร์จถูกแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กราฟแสดงคุณลักษณะของกั้บดักเสีร์จระหว่างกระแสและแรงดัน [21]

โดยส่วนมากกราฟ V-I นี้จะถูกกำหนดและทดสอบโดยผู้ผลิตแต่ละราย ย่านการทำงานของกั้บดักเสีร์จถูกแบ่งคร่าว ๆ ได้เป็น 5 ย่านด้วยกันตามระดับแรงดันที่ตกคร่อมตัวมันเอง ดังนี้

1. ย่านแรงดันใช้งาน (Operating region) ย่านนี้เป็นย่านที่กั้บดักเสีร์จจะทำงานได้ตลอดอายุการใช้งานของมัน กระแสที่ไหลผ่านตัวมันในย่านนี้จะมีค่าน้อยใกล้เคียงศูนย์ โดยย่านนี้จะค่อนข้างไวต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นกระแสที่ไหลผ่านจะมากขึ้นตามเช่นกัน
2. ย่านหัวเข้าของเส้นโค้ง (Knee of the curve) ย่านนี้เป็นค่าที่ใช้กันอย่างคร่าว ๆ ซึ่งอธิบายถึงขอบเขตความเครียดของกั้บดักเสีร์จอันเนื่องมาจากแรงดันที่ตกคร่อมโดยคร่าว ๆ เมื่อเลยจุดนี้ขึ้นไป กั้บดักเสีร์จจะเริ่มนำกระแสอย่างรวดเร็ว โดยเป็นจุดที่อยู่ระหว่างย่านของกระแสรั่วไหลและย่านการนำกระแสของกั้บดักเสีร์จนั่นเอง ดังแสดงในรูปที่ 2.4 จะแสดงเป็นจุดหัวเข้าบนเส้นโค้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ย่านแรงดันอ้างอิงและกระแสอ้างอิง ( $V_{ref} - I_{ref}$  region) เป็นย่านที่เลยจุดหัวเข้าของเส้นโค้งขึ้นมา โดยย่านนี้นับว่าเป็นย่านที่กับดักเสิร์จเริ่มนำกระแสแต่ยังคงเป็นกระแสที่มีขนาดเล็กในระดับสิบลึงร้อย mA ซึ่งย่านนี้มีคุณสมบัติที่เด่นชัดคือกระแสที่ไหลผ่านกับดักเสิร์จจะมีกระแสความต้านทาน (Resistive leakage current) ที่เด่นชัด โดยในย่านนี้ไม่มีการกำหนดระดับของกระแสที่แน่นอน เพื่อความง่ายต่อการออกแบบของผู้ผลิตแต่ละเจ้า หากสังเกตกราฟแสดงคุณลักษณะของกับดักเสิร์จ รูปที่ 2.4 จะพบว่าในย่านนี้แรงดันที่เปลี่ยนแปลงจะมีค่าเพียงเล็กน้อยเท่านั้นแต่กระแสที่ไหลผ่านกับดักเสิร์จจะค่อนข้างกว้าง
4. ย่านแรงดันเกินชั่วคราว (TOV region) ย่านนี้เริ่มต้นถัดจากเข้าของเส้นโค้งขึ้นมาและในความเป็นจริงอาจจะรวมถึงจุด  $V_{ref}$  ด้วย ขอบเขตของย่านนี้อาจจะขยายไปได้ถึงกระแสหลายสิบลึงแอมป์ ในระหว่างเหตุการณ์ TOV เช่น แรงดันไฟฟ้าของเฟสที่ไม่ได้เกิดฟอลต์เพิ่มขึ้น แรงดันที่เพิ่มขึ้นนี้จะสูงพอที่จะทำให้กระแสระดับดังกล่าวไหลได้ในระหว่างการนำไฟฟ้าในย่านนี้ ตัวต้านทานวาริสเตอร์ภายในกับดักเสิร์จจะร้อนขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากการกระจายพลังงานจำนวนมากซึ่งเกินกว่าสภาวะปกติ
5. ย่านแรงดันเกินจากการสวิตชิงและฟ้าผ่า (Switching Surge and Lightning Surge region) สำหรับทั้งย่านนี้ กับดักเสิร์จจะนำกระแสในปริมาณมาก การนำไฟฟ้าประเภทนี้เกิดขึ้นในรูปแบบอิมพัลส์เท่านั้นและระยะเวลาของแรงดันเกินอยู่ในช่วงมิลลิวินาทีไปจนถึงไมโครวินาที ลักษณะ V-I ในย่านนี้จะไม่ไวต่ออุณหภูมิ

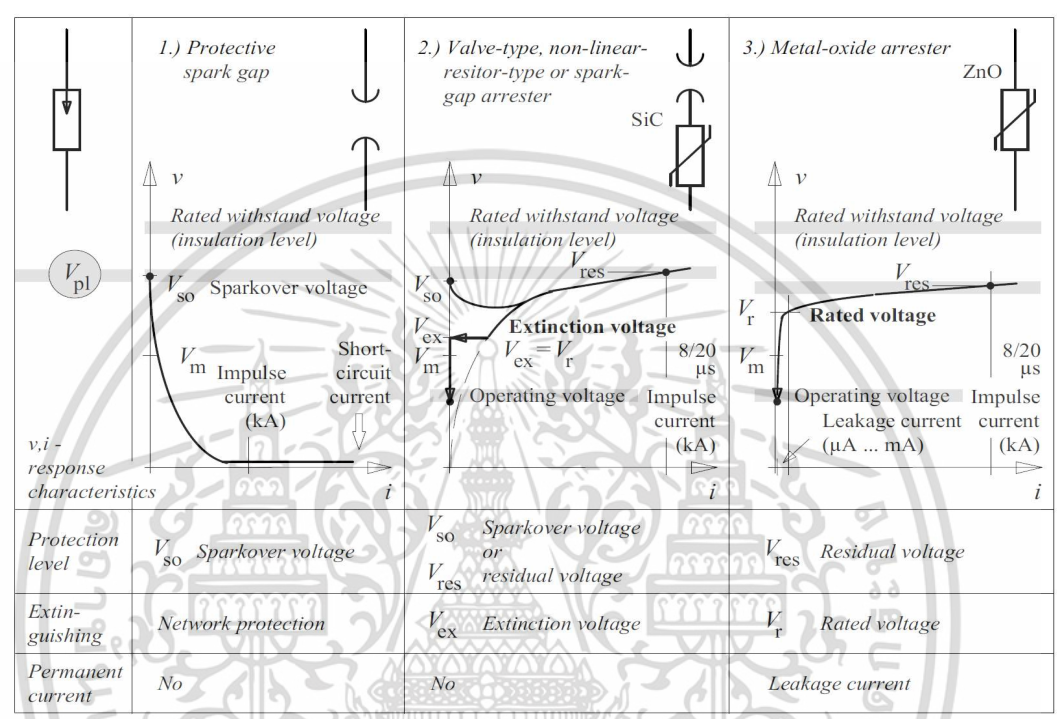
### 2.6.1 อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกิน

วิวัฒนาการของเทคโนโลยีกับดักเสิร์จนั้นมีลักษณะโดยทั้งการปรับปรุงอย่างค่อยเป็นค่อยไป ทั้งส่วนประกอบ โครงสร้าง และชนิดของฉนวนของอุปกรณ์ป้องกันต่าง ๆ ที่เปลี่ยนไป ซึ่งการใช้งานอุปกรณ์ป้องกันแต่ละตัวมีผลกระทบต่อระดับการป้องกันและต้นทุนของอุปกรณ์ระบบไฟฟ้าโดยรวมอีกด้วย หลักการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินที่จำแนกตามวิวัฒนาการการพัฒนาของอุปกรณ์ถูกสรุปและแสดงอยู่ในรูปที่ 2.5

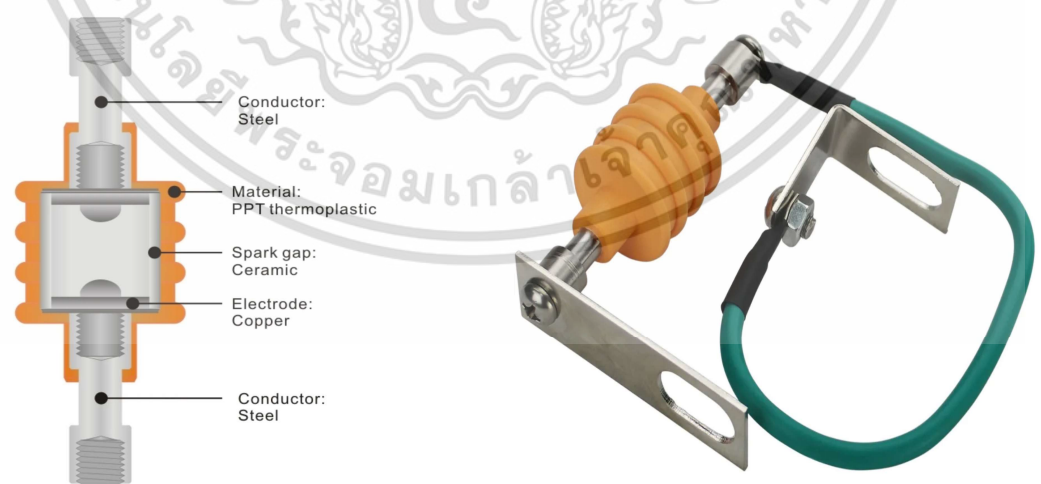
1. สปาร์คแกป (Spark gap) ในช่วงครึ่งแรกของศตวรรษที่ 20 แท่งแกปอากาศถูกนำมาใช้งานเพื่อป้องกันแรงดันเกินในระบบไฟฟ้า ซึ่งหลักการของสปาร์คแกปนั้นจะอาศัยการประสานระหว่างความคงทนของฉนวนก๊าซที่ระยะห่างต่างกับระดับการฉนวนของอุปกรณ์ที่ต้องการจะป้องกัน โดยแรงดันเบรกดาวน์ของสปาร์คแกปจะต้องมีค่าน้อยกว่าเพื่อที่จะดีสชาร์จแรงดันเกินได้ก่อน รูปแบบโครงสร้างของ สปาร์คแกปของผู้ผลิตเจ้าหนึ่งถูกแสดงในรูปที่ 2.6 [22]

จุดเด่นของสปาร์คแกปคือง่ายและราคาถูก แต่อย่างไรก็ดีสปาร์คแกปไม่สามารถใช้งานได้กับอุปกรณ์ทุกขนาดแรงดันและไม่สามารถกำจัดกระแสไหลตาม (Follow current) ความถี่กำลังได้ทำให้เกิดเหตุการณ์ไฟดับตามมา อีกทั้งการทำงานของสปาร์คแกปยังขึ้นกับองค์ประกอบหลายส่วนทำให้การ

ออกแบบนั้นเป็นไปค่อนข้างยาก อย่างไรก็ตามเรายังคงเห็นการใช้งานของสปาร์กแกปในปัจจุบันสำหรับอุปกรณ์ด้านแรงดันต่ำ สำหรับด้านแรงดันสูงนั้นยังมีอยู่บ้างแต่ความคงทนของฉนวนยังเป็นเรื่องที่ทำนายทางด้านราคา



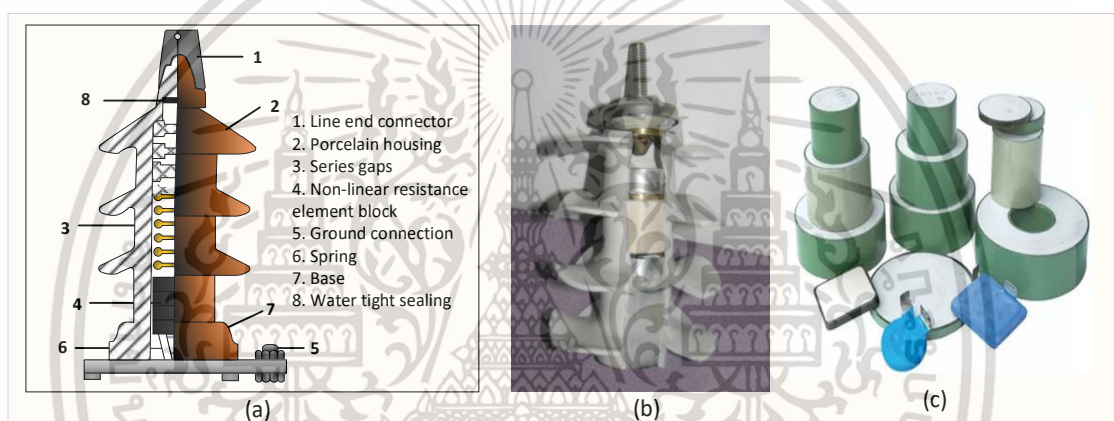
รูปที่ 2.5 หลักการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินที่แตกต่างกัน [23]



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของสปาร์กแกปที่มีขายกันในปัจจุบัน ขนาด 100kA สำหรับแรงดัน 350 V [24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. กักตักเสิร์จชนิดมีแกป (SiC Surge arrester) ถูกพัฒนาขึ้นมาในช่วงปี 1950 เป็นการใช้งานร่วมกันของตัวต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้นและแกปอากาศ (Spark gap) ที่อยู่ภายใน โครงสร้างของอุปกรณ์ถูกแสดงอยู่ในรูป 2.7 ซึ่งตัวต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้นนี้ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำชนิด SiC กักตักเสิร์จชนิดมีแกปจะมีความต้านทานที่สูงมากเนื่องด้วยการมีแกปอากาศต่ออยู่ทำให้ไม่มีกระแสไหลผ่านตัวมันเอง ณ ย่านแรงดันใช้งานเลย แต่กักตักเสิร์จชนิดนี้มีปัญหาที่สำคัญเกี่ยวกับกระแสไหลตาม(Follow current) ที่เกิดขึ้นหลังจากการดิสชาร์จแรงดันเกิน โดยกักตักเสิร์จชนิดมีแกปนี้จะไม่สามารถดับอาร์คที่เกิดขึ้นได้ ปัจจุบันมีการใช้งานน้อยลงจนเกือบเลิกใช้ไปแล้ว และถูกทดแทนด้วยกักตักฟ้าผ่าแบบไม่มีแกป



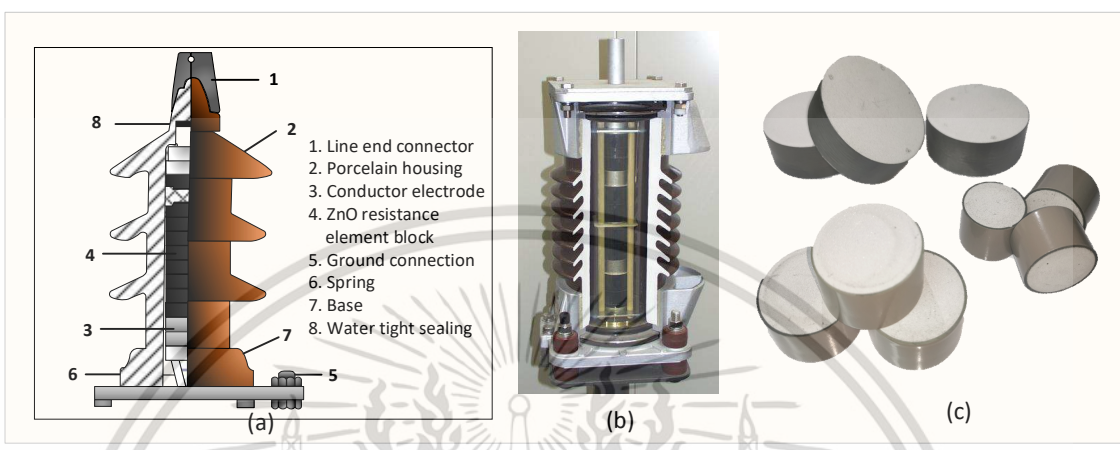
รูปที่ 2.7 โครงสร้างของกักตักเสิร์จชนิดมีแกป (a), กักตักเสิร์จชนิดมีแกปที่ใช้งาน (b) และตัวต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น SiC [25-26]

3. กักตักเสิร์จชนิด ZnO (ประมาณปี 1970) โดยจะอาศัยตัวต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นสารประกอบออกไซด์โลหะ (Metal oxide) หรือเรียกว่า กักตักไร้แกป (gapless arrester) ปัจจุบันกักตักฟ้าผ่าชนิด ZnO มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากพฤติกรรมความไม่เป็นเชิงเส้นนั้นสามารถควบคุมได้ง่ายกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.8

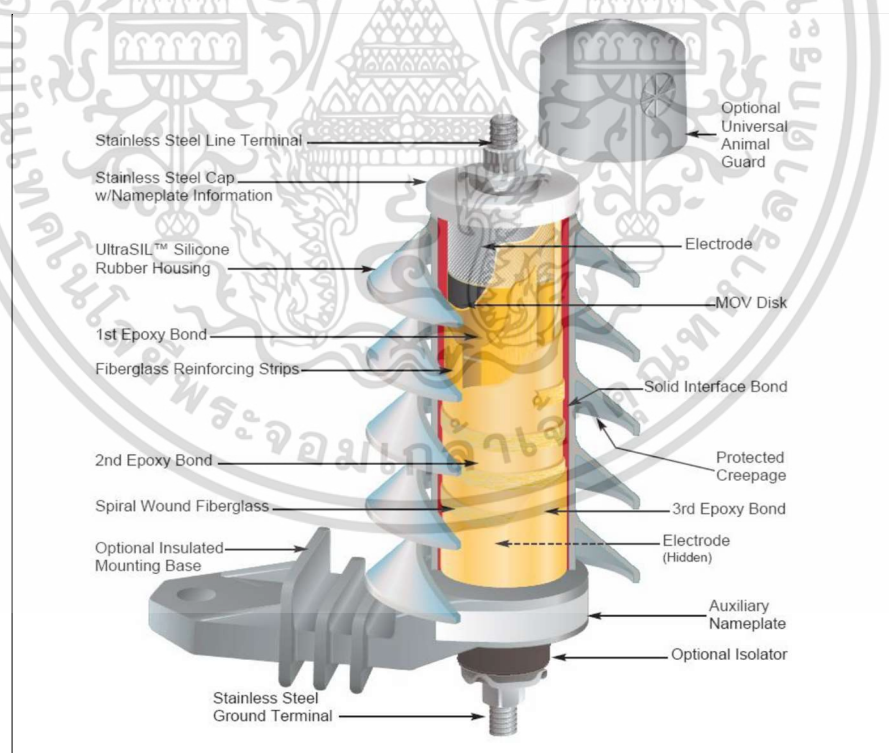
### 2.6.2 รูปแบบและโครงสร้างของกักตักฟ้าผ่าชนิด ZnO

ส่วนประกอบหลักของกักตักฟ้าผ่าโดยทั่วไปแล้วจะประกอบไปด้วยแท่ง ZnO ที่วางซ้อนกันอยู่ภายใน และถูกพันทับกันเพื่อยึดให้เข้าที่ด้วยเส้นใยไฟเบอร์ (Fiber glass) หรืออาจถูกหล่อปิดทับด้วยฉนวนเรซิน ด้านบนสุดและล่างสุดของแท่ง ZnO จะถูกวางทับด้วยตัวนำอิเล็กทรอนิกส์ บางครั้งการวางของแท่งตัวนำอาจถูกซ้อนทับมากกว่า 1 ก้อน เพื่อให้ได้ความยาวของกักตักฟ้าผ่าเพียงพอต่อระดับแรงดันที่ใช้งาน ภายนอกสุดของกักตักฟ้าผ่าจะถูกหล่อทับด้วยฉนวนที่ทำเป็นครีป เพื่อลดความเครียดของ

สนามไฟฟ้า วัสดุอาจจะเป็นได้ทั้งพอร์ซเลนหรือโพลีเมอร์ โครงสร้างของกัปกัดฟ้าผ่าที่ใช้งานทางการค้า แสดงดังรูปที่ รูปที่ 2.9



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของกัปกัดเสิร์จชนิดไม่มีแคป (a), กัปกัดเสิร์จชนิดไม่มีแคปที่ใช้งาน (b) และตัวต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น ZnO [25, 26]



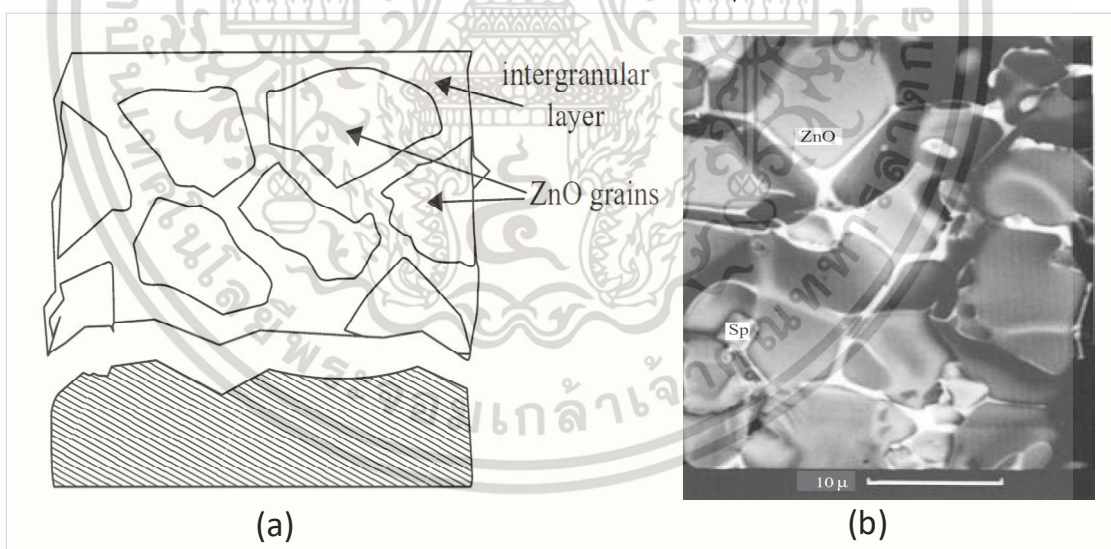
รูปที่ 2.9 โครงสร้างของกัปกัดเสิร์จชนิดไม่มีแคปที่ใช้ในทางการค้า [27]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าและความร้อนของ ZnO

ZnO เป็นสารกึ่งตัวนำ โดยภายในเนื้อโมเลกุลของ ZnO นั้นมีช่องว่างแถบพลังงานที่กว้าง ทำให้มีค่าแรงดันพังทลายที่สูง และทนต่อสนามไฟฟ้าได้สูง [28] ในการผลิตปัจจุบันของแท่งความต้านทาน ZnO นั้น มักจะผสม ZnO กับสารอื่น ๆ เช่น  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Sb}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BeO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  เพื่อให้ได้คุณสมบัติที่ดีกว่า เสถียรภาพทางไฟฟ้าของ ZnO ถูกปรับปรุงด้วยการเติมสาร  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  หรือ  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  สารดังกล่าวถูกนำมาขึ้นรูปเป็นก้อนภายใต้อุณหภูมิที่ถูกต้องจนได้ตัวต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น ZnO ที่เนื้อเกรน (grain) ละเอียดและพร้อมใช้งาน

แรงดันเบรคดาวน์ของแท่งความต้านทาน ZnO นั้นขึ้นกับขอบของเนื้อเกรน ซึ่งจะถูกล้อมรอบโดยสารเจือที่เติมเข้าไป เช่น  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Sb}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BeO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  และ SiC กระบวนการการแปรรูปของวัสดุผลึกผสม ที่ประกอบด้วยเกรนสารกึ่งตัวนำของ ZnO จะถูกล้อมรอบด้วยชั้นบาง ๆ ของวัสดุที่เติมเข้าไป ซึ่งถูกแสดงอยู่ในรูปที่ 2.10 พร้อมทั้งภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบ SEM ในรูปที่ 2.10(b) ขนาดของเกรน ZnO ถูกระบุและวัดค่าได้ประมาณ 5-20  $\mu\text{m}$  และชั้นบาง ๆ ที่อยู่ระหว่างเกรน มีความหนาประมาณ 0.2  $\mu\text{m}$  สาร ZnO มีความต้านทานจำเพาะน้อย แต่สารเคลือบรอบนอกของ ZnO นั้น มีความต้านทานจำเพาะสูงถึง 1010  $\Omega\text{-cm}$  และมี  $\epsilon_r = 500-1000$  จึงมีคุณสมบัติเป็นตัวเก็บประจุ C ดังนั้นวงจรสมมูลของกับดักเสิร์จ จึงมีทั้งองค์ประกอบของตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ



รูปที่ 2.10 โครงสร้างด้านผลึกของกับZnOในรูปแผนภาพ (a) และที่ถูกส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ (b) [28]

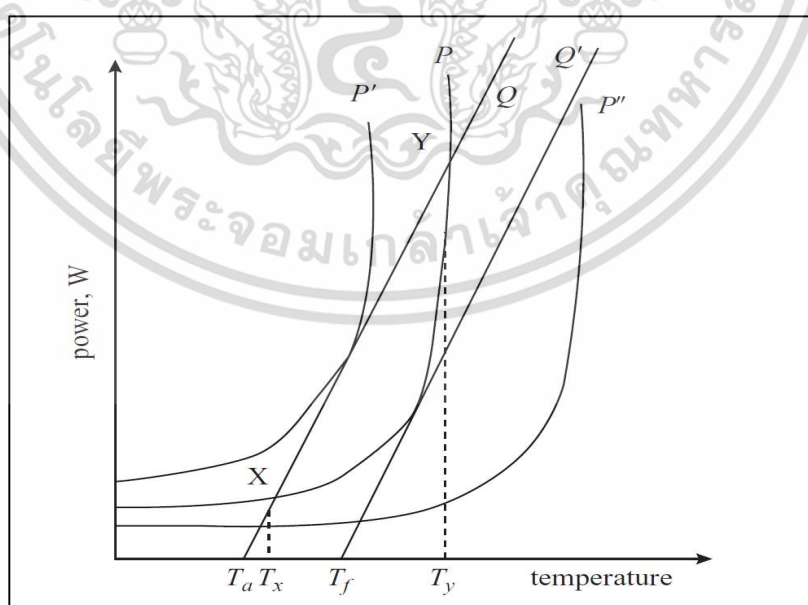
- คุณสมบัติด้านการนำไฟฟ้าของตัวต้านทาน ZnO นั้น: ถูกจำแนกออกเป็น 2 ย่านการทำงาน นั่นคือ ย่านก่อนการเบรคดาวน์ ซึ่งพฤติกรรมของที่เป็นเชิงเส้นระหว่างกระแสและแรงดัน โดยในย่านการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำงานนั้นจะถูกอธิบายด้วยพฤติกรรมการถ่ายเทประจุของ Schottky ข้ามกำแพงศักย์ของสารกึ่งตัวนำ ส่วนย่านที่สองนั้นถูกเรียกว่า ย่านเบรกดาวน ซึ่งเป็นย่านที่แสดงพฤติกรรมที่ไม่เป็นเชิงเส้นและมีกระบวนการในการนำไฟฟ้าที่ซับซ้อนกว่า [29]

- คุณสมบัติด้านความร้อนของตัวต้านทาน ZnO: จากโครงสร้างของกัปดักเสิร์จรูปที่ 2.9 นั้น ตัวต้านทาน ZnO ถูกหุ้มด้วยฉนวนแข็งซึ่งเป็นฉนวนหุ้มด้านนอก แสดงให้เห็นถึงข้อจำกัดในการระบายความร้อนของกัปดักเสิร์จ ดังนั้นการศึกษาคุณสมบัติด้านความร้อนจึงเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญ เสถียรภาพทางอุณหภูมิของตัวต้านทาน ZnO นั้น ขึ้นกับอุณหภูมิโดยรอบภายนอก, ความสามารถในการกระจายความร้อน, การเสื่อมสภาพของตัวต้านทานด้วยกระแสโวลต์ และการเสื่อมอายุ

เพื่อให้ได้เสถียรภาพทางด้านอุณหภูมิของตัวต้านทาน ZnO นั้น ค่ากำลังไฟฟ้าที่กระจายจากการดิสชาร์จ กระแสจะต้องมีค่าเท่ากับ ค่าความร้อนที่ระบายออกสู่ภายนอก และเกิดสมดุลเส้นกราฟในรูปที่ 2.11 แสดงถึงเสถียรภาพทางอุณหภูมิ ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานและอุณหภูมิ อุณหภูมิ  $T_a$  แสดงถึงอุณหภูมิภายนอก จุดตัด X แสดงถึงอุณหภูมิที่ต่ำที่สุดที่ตัวต้านทานยังคงอยู่ในเสถียรภาพอยู่ และจุดตัด Y แสดงถึงขอบสูงสุดของอุณหภูมิที่ยังคงอยู่ในเสถียรภาพหรืออีกนัยหนึ่งคืออุณหภูมิยังคงระบายสู่ภายนอกได้ เมื่อเลยจุด Y ขึ้นไป กัปดักเสิร์จ จะไม่สามารถระบายความร้อนที่อยู่ในตัวมันได้ ค่าพลังงานที่ต่างกันระหว่างจุด X และจุด Y ถูกเรียกว่า ค่าพลังงานที่ยอมรับได้ของกัปดักเสิร์จ (allowable surge energy)



รูปที่ 2.11 เส้นกราฟแสดงเสถียรภาพทางอุณหภูมิของกัปดักเสิร์จ [29]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามค่าความจุพลังงานของกัปดักเสิร์จที่ทดได้ อาจจะทำกว่าในทางปฏิบัติ เนื่องจากความเสียหายจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบทันทีทันใด(Thermal shock) หรือการเกิดการพังทลาย(Puncture) ภายใน ยิ่งช่วงของTx และTy มีขนาดกว้างขึ้น ก็แสดงถึงค่าความจุความร้อนของกัปดักเสิร์จที่จะรับได้มากขึ้นเช่นกัน

### 2.6.3 การเสื่อมสภาพและอายุของอุปกรณ์กัปดักเสิร์จ

โดยทั่วไปแล้วการเสื่อมสภาพของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ถูกทำโดยการเทียบเคียงคุณสมบัติต่าง ๆ (ไม่ว่าจะเป็นทางกลหรือทางไฟฟ้า) ของสถานะปัจจุบันและในอดีต ลักษณะการวิเคราะห์การเสื่อมสภาพนั้นต้องอาศัยข้อมูลจากการบันทึกเก็บค่าแล้วนำมาตีความ เมื่อการเสื่อมสภาพนั้นถูกวิเคราะห์และตีความแล้ว ก็จะถูกนำมาใช้ประเมินอายุของอุปกรณ์ตามมา เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้น

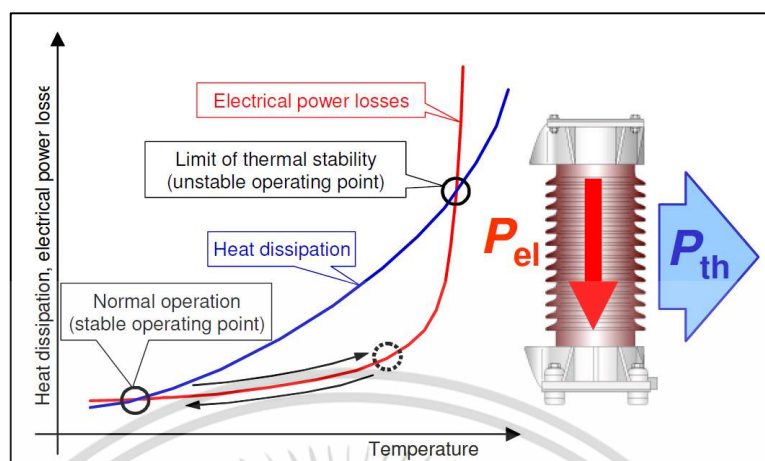
การประเมินการเสื่อมสภาพของกัปดักเสิร์จนั้นถูกเก็บข้อมูลและวิเคราะห์กันมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน มีงานวิจัยหลายงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการเสื่อมสภาพของกัปดักเสิร์จ ด้วยเทคนิควิธีการที่ต่างกันไป ทำให้การวิเคราะห์การเสื่อมสภาพสามารถทำได้แม่นยำมากขึ้น ยกตัวอย่างเช่น

1. การศึกษาผลของกระแส Polarization และ Depolarization ของกัปดักเสิร์จ ที่ถูกนำเสนอโดย Welson Bassi และ He'dio Tatizawa ซึ่งข้อมูลที่ถูกวัดด้วยตัวแปรต่าง ๆ ถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อทำนายช่วงเวลาก่อนที่กัปดักเสิร์จจะเกิดความเสียหาย หรือในงานวิจัยอื่น ๆ ก็ตามได้เริ่มมีการนำเสนอเทคนิคนี้มาใช้ในการวิเคราะห์เช่นกัน โดยสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก [30-32]

2. เทคนิคการศึกษาจากการวิเคราะห์ข้อมูลของพลังงานที่กัปดักเสิร์จนั้นรับเอาไปตลอดอายุการใช้งาน แนวคิดนี้มุ่งเสนอถึงพลังงานที่กัปดักเสิร์จนั้นสามารถทนได้โดยไม่เกิดความเสียหาย เป็นที่ทราบกันดีว่ากัปดักเสิร์จของผู้ผลิตแต่ละรายนั้นมีความสามารถในการดูดซับพลังงานระหว่างดิสชาร์จแรงดันเกิน (Energy handing capability) ได้ต่างกัน

โดยหากกัปดักเสิร์จรับพลังงานมากกว่าค่าที่มันสามารถรับได้ ก็จะทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในนำไปสู่การเกิดรอยแตกกร้าวหรือการเสียดียรภาพทางความร้อน (Thermal runaway) รูปที่ 2.12 แสดงถึงค่าความร้อนที่กัปดักเสิร์จสามารถระบายออกได้กับอุณหภูมิ โดยหากกัปดักเสิร์จมีอุณหภูมิเกินค่าที่

กำหนดของเสียดียรภาพทางอุณหภูมิที่สามารถรับได้ ก็จะทำให้เกิดความเสียหายตามมา เทคนิคการศึกษาโดยใช้ค่าพลังงานที่กัปดักเสิร์จสามารถทนได้ดี ได้รับการศึกษากันในวงกว้าง ตั้งแต่ในงานวิจัยระดับเล็กที่ศึกษากับตัวต้านทานวาริสเตอร์ของระดับแรงดันต่ำ และในระดับของ ZnO วาริสเตอร์ หรือในระดับแรงดันสูงของกัปดักเสิร์จ ZnO [33-35]

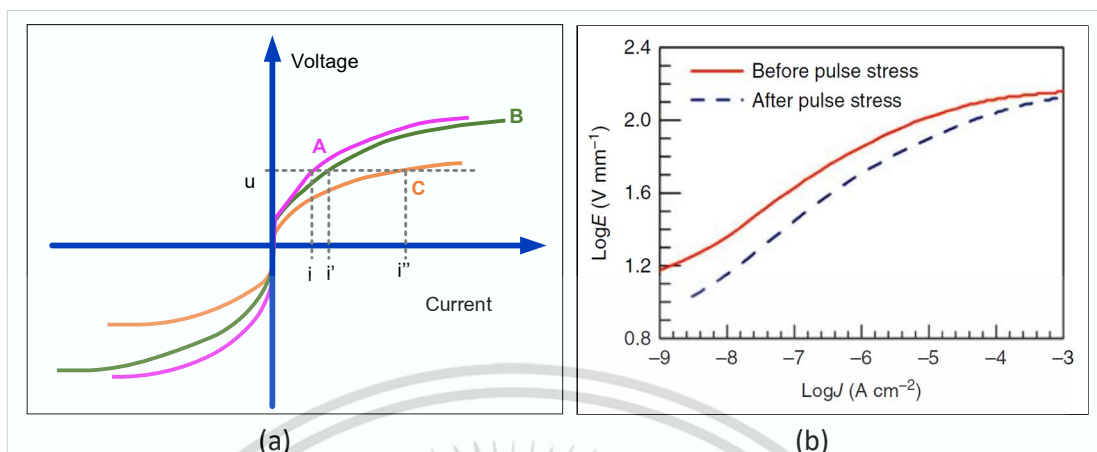


รูปที่ 2.12 เส้นกราฟแสดงเสถียรภาพพลังงานทางไฟฟ้าและความร้อนของกัปดักเสิร์จต่ออุณหภูมิที่เกิดขึ้น [36]

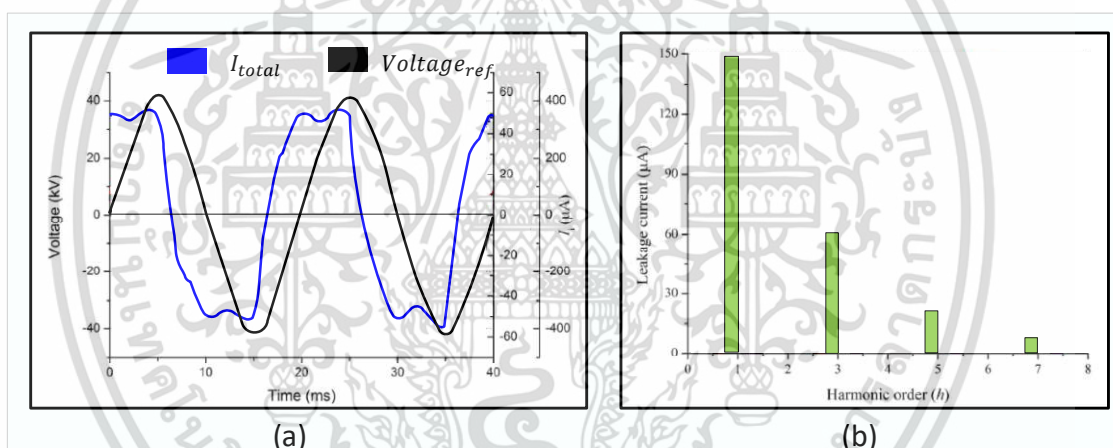
3. เทคนิคที่วิเคราะห์จากอุณหภูมิของกัปดักเสิร์จ เป็นที่ทราบกันดีว่าเหตุการณ์หนึ่งที่บ่งบอกการเสื่อมสภาพของกัปดักเสิร์จคือ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ และหากอุณหภูมินั้นเพิ่มมากขึ้น กัปดักเสิร์จจะมีโอกาสเกิดการสูญเสียเสถียรภาพทางอุณหภูมิได้ งานวิจัยที่ศึกษาทางด้านเทคนิคนี้ได้แก่ [37-38]

4. เทคนิคการวิเคราะห์จากกระแสรั่วของกัปดักเสิร์จ วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน อีกทั้งเทคนิคนี้ยังถูกนำมาใช้ในการทำอุปกรณ์เพื่อมอนิเตอร์กัปดักเสิร์จในทางพาณิชย์อีกด้วย จากกราฟความสัมพันธ์คุณลักษณะของแรงดันและกระแสของกัปดักเสิร์จรูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นว่า ในย่านการทำงาน (operating region) ของกัปดักเสิร์จจะมีกระแสที่รั่วไหลผ่านตัวมันเองลงมายังสายกราวด์ด้านล่าง และที่แรงดันสูงขึ้นไปเล็กน้อย กระแสก็มีค่าเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันที่แรงดันคงเดิม หากกัปดักเสิร์จมีการเสื่อมสภาพ กระแสรั่วไหลผ่านตัวมันเองจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.13

โดยการวัดกระแสรั่วนี้ ตัวแปรที่บ่งบอกถึงการเสื่อมสภาพของกัปดักเสิร์จได้ดีที่สุดคือ กระแสรั่วไหลความต้านทาน (Resistive Leakage current) ซึ่งความเป็นจริงแล้วในทางปฏิบัติสามารถทำได้ยากมาก เนื่องจากมีสัญญาณรบกวนจากภายนอกและฮาร์มอนิกทางไฟฟ้าจากแรงดันไฟฟ้าในระบบ ดังนั้นในบางครั้ง การวิเคราะห์กระแสรั่วไหลของกัปดักเสิร์จจึงใช้ในรูปแบบของการวิเคราะห์ข้อมูลของฮาร์มอนิกที่ 3 ได้เช่นกัน แนวคิดนี้ได้มาจากการแยกกระแสรั่วไหลความต้านทานของกัปดักเสิร์จออกมาแล้วพบว่า ไม่ได้เป็นรูปคลื่นไซน์อย่างสมบูรณ์แต่ประกอบด้วยฮาร์มอนิกหลายลำดับ ดังนั้นลำดับที่สามารถบ่งบอกการเพิ่มขึ้นของการเสื่อมอายุได้ดีที่สุดคือฮาร์มอนิกที่ 3 (ถูกแสดงในรูปที่ 2.14) ซึ่งวิธีนี้ยังเป็นอีกหนึ่งวิธีที่นิยมกันอีกด้วยเนื่องจากมีผลกระทบจากสัญญาณรบกวนภายนอกและภายในระบบไฟฟ้าน้อยกว่า



รูปที่ 2.13 กราฟคุณลักษณะของกั๊บตักเสีร้จที่เปลี่นไปเมื่อเสีอมสภาพลวง (a) และ กราฟความสัมพันธ์ของ J-E กั๊บตักเสีร้จ ZnO ก่อนและหลังได้ร้บความเครียดจากการป้อนพัลส์เข้าไป (b) [39]



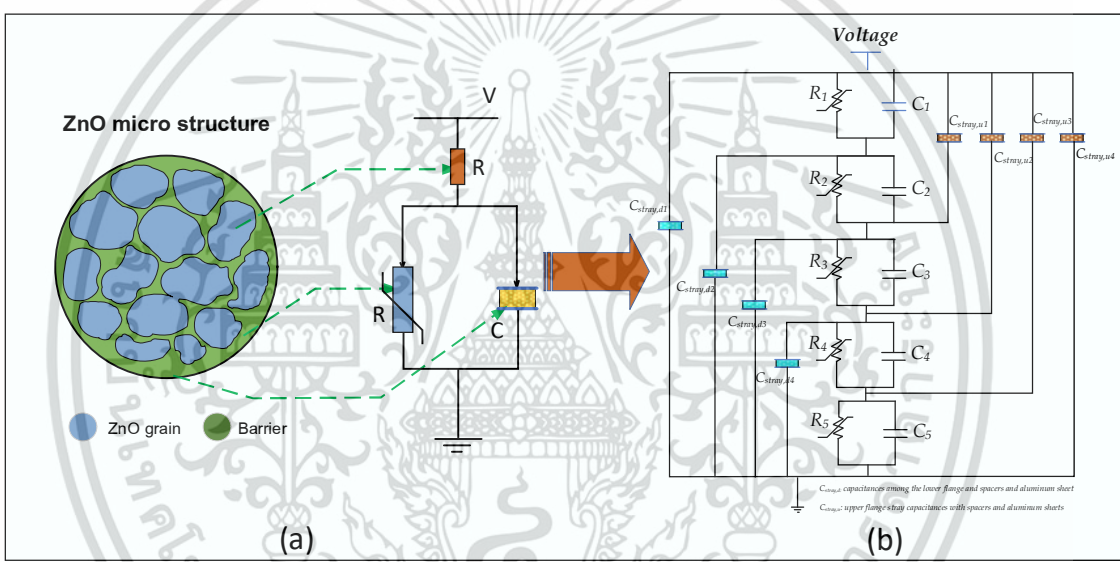
รูปที่ 2.14 องค์ประกอบของกระแสรั่วไหลรวมของกั๊บตักเสีร้จ (a) และ ลำดับขององค์ประกอบของฮาร์โมนิกที่ผสมอยู่ (b) [40]

## 2.7 กระแสรั่วไหลของกั๊บตักเสีร้จชนิดไม่มีแกบ

จากหัวข้อที่ผ่านมาข้างต้นได้ให้มุมมองความคิดเกี่ยวกับคุณลักษณะของกั๊บตักเสีร้จมาบ้างแล้ว ทั้งด้านการทำงานในย่านต่าง ๆ กราฟคุณลักษณะแรงดันและกระแส โครงสร้าง ตลอดจนชนิดของกั๊บตักเสีร้จ อีกทั้งยังกล่าวถึงโครงสร้างโมเลกุลที่อยู่ภายในซึ่งสะท้อนถึงพฤติกรรมการทำงาน (หัวข้อที่ 2.6.2) ซึ่งเป็นตัวต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวงจรมมูลอย่างง่ายของกั๊บตักเสีร้จซึ่งนำไปสู่การวิเคราะห์การเสีอมสภาพด้วยกระแสรั่วไหล วงจรมมูลของกั๊บตักเสีร้จนั้นประกอบไปด้วย

1. ตัวต้านทานชั้นนอกซึ่งสะท้อนจากความต้านทานภายในตัวมันเองของเนื้อเกรน หรือกระแสรั่วไหลภายนอกที่ผิว
2. ตัวต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งสะท้อนจากพฤติกรรมการดิสชาร์จแรงดันเกิน
3. ตัวเก็บประจุซึ่งสะท้อนจากคุณสมบัติในการเกิดโพลาไรเซชันของวัสดุ และค่าตัวเก็บประจุแฝง(Stray capacitance)

รูปที่ 2.15 ด้านล่างแสดงถึงส่วนประกอบวงจรสมมูลของกับดักเสิร์จทั้งวงจรร้อย่างง่ายของแท่ง ZnO หนึ่งแท่ง(a) และ วงจรสมมูลของกับดักเสิร์จที่ประกอบไปด้วยแท่ง ZnO หลาย ๆ แท่งวางซ้อนต่อกัน(b)



รูปที่ 2.15 วงจรสมมูลอย่างง่ายของแท่ง ZnO (a) และ วงจรสมมูลเมื่อนำแท่งตัวนำไม่เป็นเชิงเส้น ZnO วางซ้อนกัน 5 ชั้นประกอบเป็นกับดักเสิร์จ (b) [41]

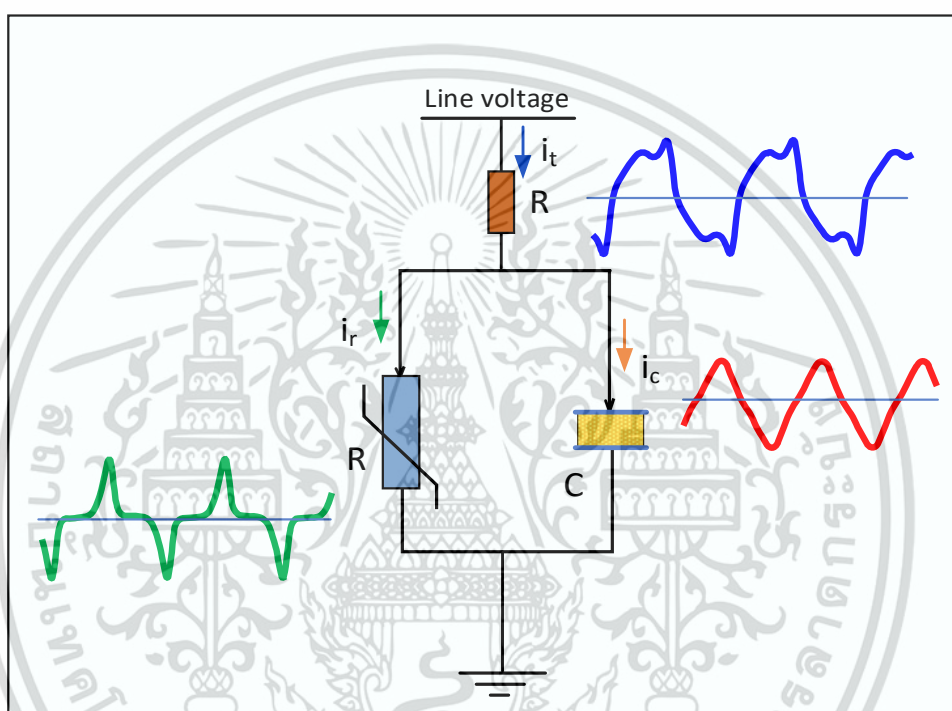
เมื่อกับดักเสิร์จถูกวางภายใต้สนามไฟฟ้าจากแรงดันที่ตกคร่อมขั้วอิเล็กโตรดทั้งสองและเนื่องจากผลของความต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้นนั้น แม้ในย่านการทำงานของกับดักเสิร์จเองทำให้ตัวมันเองมีกระแสที่ไหลผ่านได้ขนาดเล็ก ๆ (50-200  $\mu$ A) โดยกระแสรั่วไหลนี้เรียกว่ากระแสรั่วไหลรวม ซึ่งมีองค์ประกอบ 2 ส่วนด้วยกัน (แสดงในรูปที่ 2.16) คือ

1. องค์ประกอบของตัวเก็บประจุ: กราฟสัญญาณกระแสจะมีลักษณะเกือบจะเป็นคลื่นรูปไซน์ เนื่องด้วยพฤติกรรมของตัวเก็บประจุ มุมเฟสของกระแสจะต่างกับแรงดันอ้างอิงที่ขั้วของกับดักเสิร์จ 90° ในตอนเริ่มแรกกระแสตัวเก็บประจุนี้จะมีค่ามากกว่ากระแสองค์ประกอบตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้านทาน แต่เมื่อกับดักเสิร์จเกิดการเสื่อมสภาพ ค่ายอดของกระแสจะมีค่าน้อยกว่ากระแสองค์ประกอบความต้านทานอย่างเห็นได้ชัด

- องค์ประกอบของตัวต้านทาน: กราฟของสัญญาณกระแสจะมีลักษณะไม่เป็นรูปไซน์ แต่มีลักษณะสัมพันธ์ตามคาบเวลาของแรงดัน อีกทั้งยังมีมูมเฟสเดียวกับแรงดันอ้างอิงอีกด้วย ซึ่งองค์ประกอบของตัวต้านทานนี้เองที่แสดงถึงการเสื่อมสภาพของกับดักเสิร์จ



รูปที่ 2.16 องค์ประกอบของกระแสรั่วไหลของกับดักเสิร์จ

แม้ว่ากระแสรั่วไหลความต้านทานนี้จะเป็นตัวแปรที่บอกถึงการเสื่อมสภาพของกับดักเสิร์จได้ดี แต่การแยกองค์ประกอบออกมาจากกระแสรั่วไหลรวมนั้นค่อนข้างที่จะซับซ้อน ในมาตรฐานของ IEC ได้ให้แนวทางการแยกองค์ประกอบของกระแสรั่วไหลหลายวิธีด้วยกัน ในตารางที่ 2.3 ได้สรุปวิธีการแยกองค์ประกอบเอาไว้ พร้อมทั้งข้อดีและข้อเสียของวิธีต่าง ๆ ดังนี้ [42]

- ใช้แรงดันตกคร่อมเพื่อเป็นสัญญาณอ้างอิง: วิธีการนี้อาศัยการใช้สัญญาณอ้างอิงจากแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมกับดักเสิร์จ สัญญาณอ้างอิงสามารถใช้สำหรับการอ่านค่าส่วนประกอบของกระแสรั่วตัวต้านทานได้ทันทีเมื่อแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่จุดสูงสุด ( $dU/dt=0$ ) สามารถอ่านแรงดันไฟฟ้าและระดับกระแสรั่วตัวต้านทานด้วยออสซิลโลสโคปหรืออุปกรณ์ที่คล้ายกัน วิธีนี้เป็นวิธีการทั่วไปที่ใช้ในห้องปฏิบัติการเพื่อการตรวจวัดที่แม่นยำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การหักล้างกันของกระแสตัวเก็บประจุโดยใช้แรงดันอ้างอิง: มีหลักการคร่าว ๆ คือการใช้วงจรบริดจ์แรงสูงเพื่อปรับค่าของกระแสรั่วที่ได้รับกับกระแสตัวเก็บประจุจนกระทั่งวงจรบริดจ์มีความสมดุลจึงเหลือเพียงเฉพาะกระแสของตัวต้านทานเท่านั้น
3. การหักล้างกันของกระแสตัวเก็บประจุโดยไม่ใช้แรงดันอ้างอิง: หลักการพื้นฐานคือสัญญาณอ้างอิงของความถี่พื้นฐานถูกสร้างขึ้นโดยสังเคราะห์จากข้อมูลที่ได้จากกระแสรั่วโดยการปรับแอมพลิจูดและมุมเฟสซึ่งสามารถทำได้โดยอัตโนมัติหรือโดยใช้ออสซิลโลสโคป เพื่อชดเชยส่วนประกอบของตัวเก็บประจุ
4. การหักล้างองค์ประกอบกระแสตัวเก็บประจุด้วยการรวมกระแสรั่วทั้ง 3 เฟส: วิธีการนี้ถูกทำโดยพื้นฐานที่เชื่อว่ากระแสองค์ประกอบตัวเก็บประจุของกับดักเสิร์จในแต่ละเฟสจะเลื่อนจากสัญญาณแรงดันเป็นมุมคงที่  $90^\circ$  และเป็นสัญญาณรูปคลื่นไซน์ โดยหากเรานำกระแสรั่วที่มีองค์ประกอบของตัวเก็บประจุในแต่ละเฟสเหล่านี้มารวมกัน ผลของกระแสตัวเก็บประจุทั้งหมดจะถูกหักล้างซึ่งกันและกัน

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของวิธีการวัดกระแสรั่วไหลความต้านทานในแต่ละวิธี

วิธีการวัดกระแสรั่วไหล	ค่าตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อ			ประสิทธิภาพในการวิเคราะห์		ประสบการณ์ในการใช้งานจริง
	ฮาร์มอนิกจากแรงดันระบบ	ความต่างเฟสของการวัดของกระแส	กระแสรั่วไหลที่ผิว	ประสิทธิภาพของข้อมูลที่ได้	ความซับซ้อน	
ใช้แรงดันตกคร่อมเพื่อเป็นสัญญาณอ้างอิง	ปานกลาง	สูง	สูง	ปานกลาง	สูง	จำกัด
ใช้การหักล้างกันของกระแสตัวเก็บประจุโดยใช้แรงดันอ้างอิง	ปานกลาง	สูง	สูง	ปานกลาง	สูง	จำกัด
ใช้การหักล้างกันของกระแสตัวเก็บประจุโดยไม่ใช้แรงดันอ้างอิง	ปานกลาง	สูง	สูง	ปานกลาง	ต่ำ	ไม่มีข้อมูล
การหักล้างองค์ประกอบกระแสตัวเก็บประจุด้วยการรวมกระแสรั่วทั้ง 3 เฟส	สูง	สูง	สูง	ต่ำ	ต่ำ	จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### ตัวอย่างทดสอบและรายละเอียดการทดลอง

ในบทนี้อธิบายถึงรายละเอียดคุณสมบัติของตัวอย่างทดลอง ค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้อง วงจรการทดสอบ การออกแบบการทดลอง ตลอดจนถึงรายละเอียดการทดลอง ซึ่งการทดลองนั้นถูกออกแบบแบบใหญ่ ๆ ได้เป็น 2 หัวข้อตามวัตถุประสงค์การทดลอง อันได้แก่

1. การทดลองที่ 1: การศึกษาการเปลี่ยนแปลงกระแสรั่วไหลที่ไม่สมมาตรเนื่องด้วยอิทธิพลของกระแสอิมพัลส์แบบต่อเนื่อง
2. การทดลองที่ 2: การศึกษาผลของรูปคลื่นกระแสรั่วไหลที่ไม่สมมาตรเนื่องด้วยอิทธิพลของกระแสอิมพัลส์แบบต่อเนื่องที่มีขั้วของกระแสต่างกัน

#### 3.1 ตัวอย่างทดสอบ

ในการทดลองนี้ตัวอย่างทดสอบที่ถูกนำมาใช้เป็นกัปดักเสิร์จชนิดไม่มีแก๊สสำหรับระบบจำหน่าย (Distribution class) ที่เป็นยี่ห้อของผู้ผลิตในพื้นที่ ซึ่งตัวอย่างทดสอบที่ถูกนำมาใช้นี้ประกอบด้วยกัน 2 ยี่ห้อตามหัวข้อการทดลองที่กล่าวมาข้างต้นโดยถูกแสดงในตารางที่ 3.1 และ ตารางที่ 3.2 พร้อมทั้งรูปของกัปดักเสิร์จทั้งสองถูกแสดงในรูปที่ 3.1

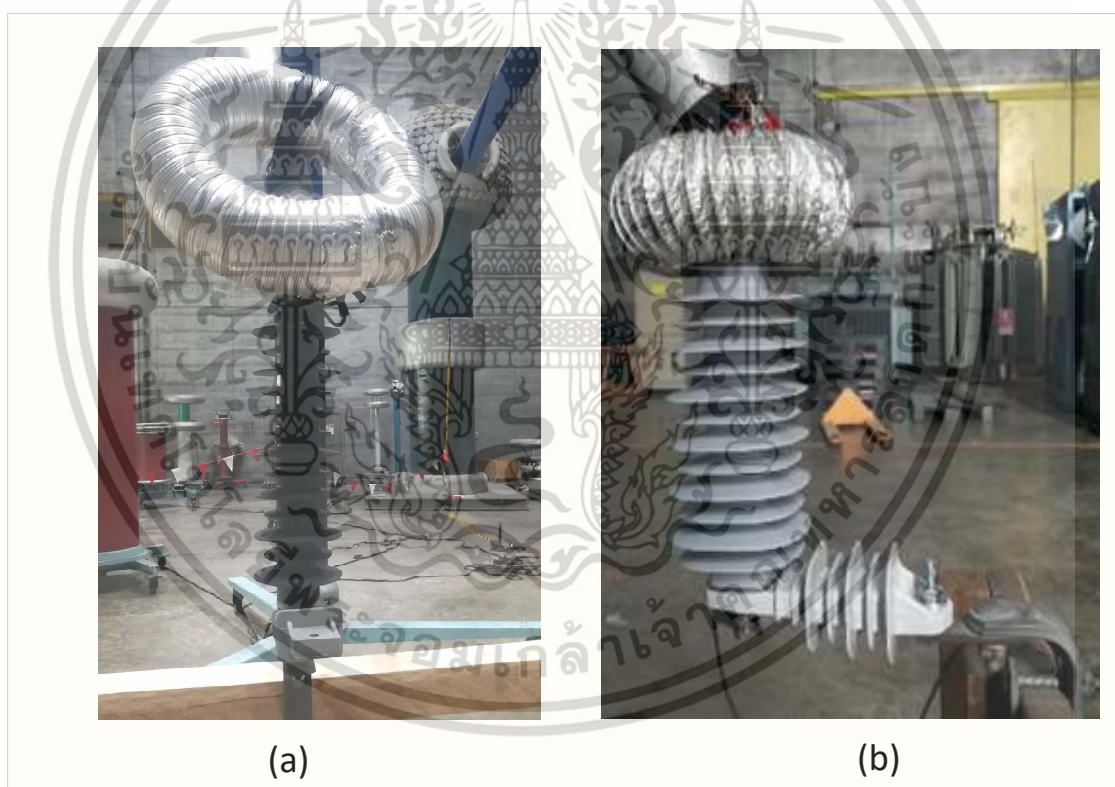
ตารางที่ 3.1 รายละเอียดคุณสมบัติของกัปดักเสิร์จผู้ผลิตที่ 1 สำหรับการทดลองที่ 1

ตัวแปร	ค่า	หน่วย
ระดับแรงดันใช้งาน (Rated voltage)	21	kV
ระดับแรงดันใช้งานต่อเนื่อง (Continuous operating voltage)	17	kV
พิกัดกระแสดีสชาร์จ (Rated discharging current)	5	kA
ค่ายอดแรงดันคงเหลือของกระแสหน้าคลื่นขั้น (Max. steep current impulse residual voltage)	72.5	kV
ค่ายอดแรงดันคงเหลือของกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า 5 kA (Max. Lightning impulse current residual voltage)	70	kV
ค่าระยะรั่วไหลของครีปด้านนอก (Leakage distance)	680	mm
ความสูงของกัปดักเสิร์จ	432	mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดคุณสมบัติของกัปดักเสิร์จผู้ผลิตที่ 2 สำหรับการทดลองที่ 2

ตัวแปร	ค่า	หน่วย
ระดับแรงดันใช้งาน (Rated voltage)	24	kV
ระดับแรงดันใช้งานต่อเนื่อง (Continuous operating voltage)	19.2	kV
พิกัดกระแสดีสชาร์จ (Rated discharging current)	10	kA
ค่ายอดแรงดันคงเหลือของกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า 10 kA (Max. Lightning impulse current residual voltage)	63.6 kV	kV
ค่าระยะรั้วไหลของครีปด้านนอก (Leakage distance)	820	mm
ความสูงของกัปดักเสิร์จ	378	mm

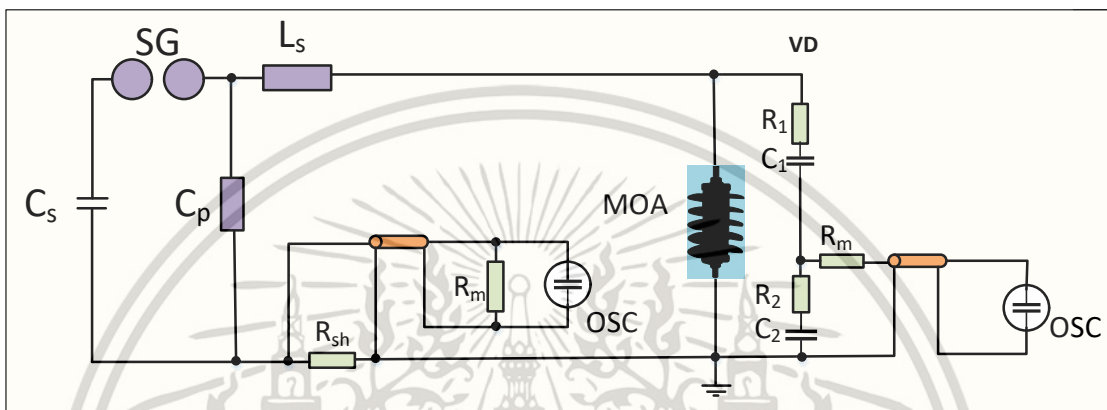


รูปที่ 3.1 กัปดักเสิร์จทางการค้าที่เป็นตัวอย่างทดสอบของการทดลองที่ 1 (a) และ การทดลองที่ 2 (b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 วงจรจ่ายกระแสอิมพัลส์ (Residual voltage test circuit)

วงจรที่ถูกต้องใช้ในการป้อนกระแสอิมพัลส์ (ในรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3) นั้นถูกทำบนพื้นฐานของมาตรฐานเพื่อให้ได้มาซึ่งกระแสอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน 8/20  $\mu\text{s}$  ตามมาตรฐาน IEC 60099-4 ในหัวข้อที่ 7.3 [42]

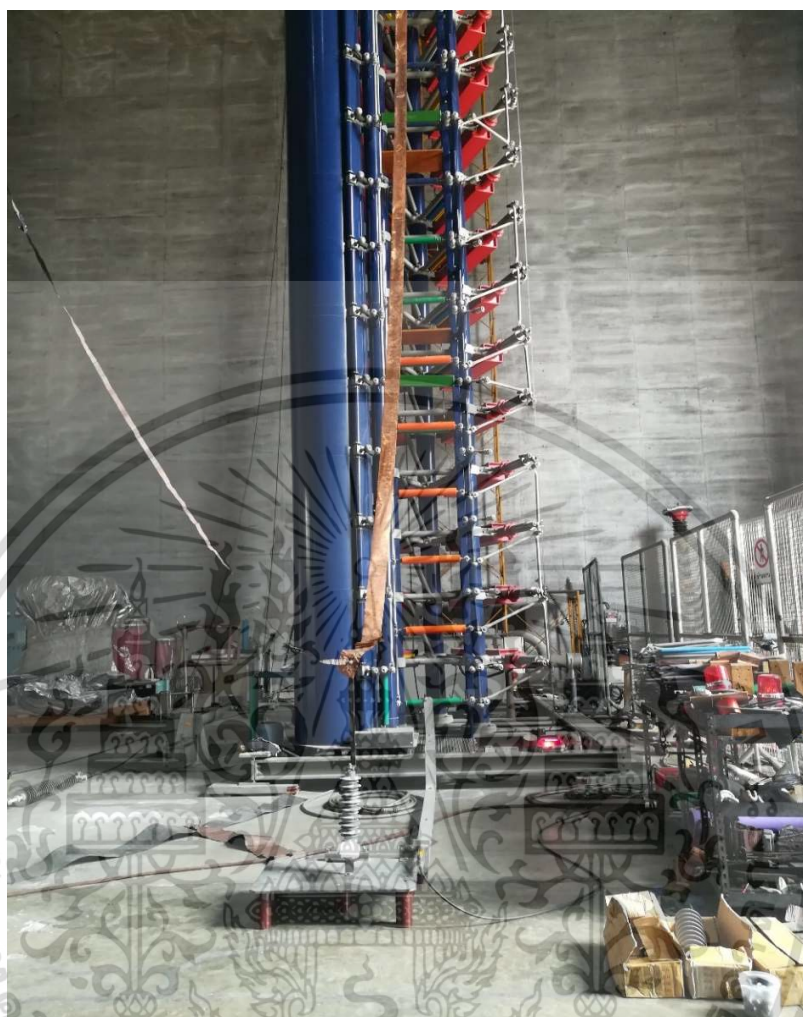


รูปที่ 3.2 วงจรทดสอบสำหรับป้อนกระแสอิมพัลส์ไฟฟ้ารูปคลื่นมาตรฐาน 8/20 $\mu\text{s}$

โดยที่  $C_s$  คือ ตัวเก็บประจุอนุกรม  
 $C_p$  คือ ตัวเก็บประจุขนาน  
 $R_{sh}$  ตัวต้านทานชั้ด  
osc ออสซิลโลสโคป  
MOA กับดักเสิร์จ

SG คือ สปาร์กแกป  
 $L_s$  คือตัวเหนี่ยวนำอนุกรม  
VD อุปกรณ์ลดทอนแรงดัน  
 $R_m$  ตัวอนุกรมสำหรับแมชซิ่ง

วงจรที่สร้างกระแสอิมพัลส์ถูกชาร์จด้วยแรงดันกระแสตรงให้กับตัวเก็บประจุ จากนั้นเมื่อ สปาร์กแกปถูกสั่งให้ทำงาน พลังงานที่สะสมอยู่ในตัวเก็บประจุจะถูกดีสชาร์จให้กับกับดักเสิร์จซึ่งเป็นวัสดุทดสอบผ่านตัวเหนี่ยวนำและตัวต้านทานเพื่อปรับรูปคลื่นให้ได้ตามกำหนด ในขณะเดียวกันแรงดันคงเหลือเมื่อกับดักเสิร์จทำงานจะถูกวัดด้วยอุปกรณ์ลดทอนแรงดัน และกระแสที่ดีสชาร์จจะถูกวัดด้วยตัวต้านทานทานชั้ด รูปคลื่นกระแสและแรงดันชั่วครู่ที่วัดได้จะถูกบันทึกและแสดงผลผ่านทางหน้าจอของออสซิลโลสโคป คุณสมบัติของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบถูกให้ไว้ในภาคผนวก ก



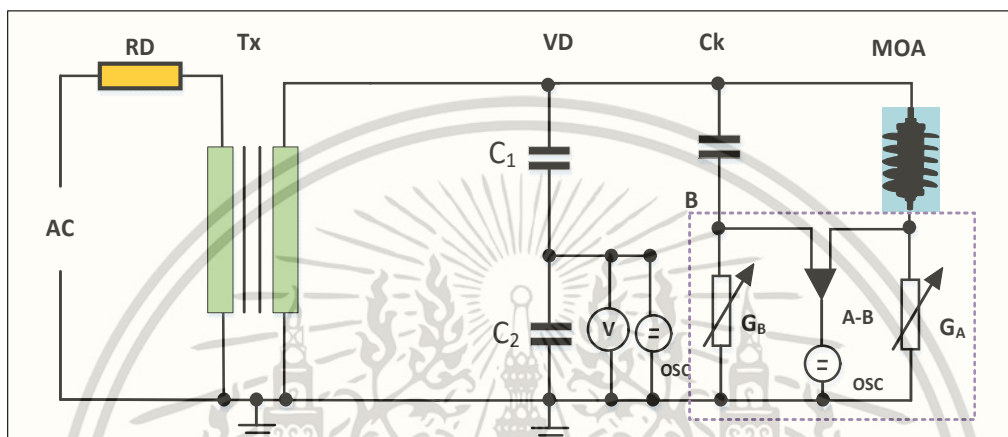
รูปที่ 3.3 วงจรทดสอบกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า

### 3.3 วงจรวัดกระแสรั่วความต้านทาน (Reference voltage measurement circuit)

จากบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.7 มาตรฐาน IEC6099-5 ได้แนะนำไว้ถึงการได้มาซึ่งกระแสรั่วความต้านทานของกักตักเสิร์จไว้หลายวิธีด้วยกัน โดยในงานวิจัยฉบับนี้การหักล้างผลของกระแสตัวเก็บประจุถูกนำมาใช้ในการทดสอบ เนื่องจากเป็นวิธีที่มีความแม่นยำค่อนข้างสูงและเหมาะสำหรับการทดสอบภายในห้องทดสอบ โดยวงจรทดสอบถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3.4 หม้อแปลงถูกขึ้นแรงดันและแปลงเพิ่มแรงดันขึ้นมาแบบคงที่ (Ramp) จ่ายให้กับกักตักเสิร์จที่ถูกต่ออยู่ในวงจรซึ่งถูกต่อขนานด้วยตัวเก็บประจุมาตรฐาน  $C_k$  สัญญาณกระแสที่ไหลผ่านกักตักเสิร์จและตัวเก็บประจุถูกป้อนเข้าสู่อุปกรณ์บริดจ์ (Bridge circuit) เพื่อทำการเปรียบเทียบกระแส ภายในอุปกรณ์บริดจ์นั้นประกอบด้วยตัวเก็บประจุและอิมพีแดนซ์ที่ปรับค่าได้ทั้งสองฝั่ง ซึ่งในการทดสอบนั้นด้านสัญญาณขาเข้ากระแสรั่วของกักตักเสิร์จจะถูกคงที่ไว้ ส่วนสัญญาณ

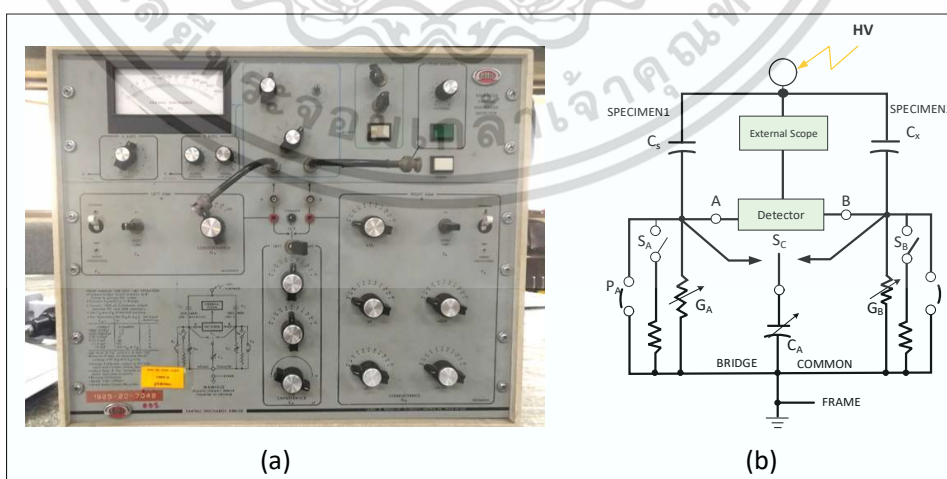
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของกระแสตัวเก็บประจุอ้างอิงจะถูกปรับสเกลจากตัวเก็บประจุปรับค่าได้ในวงจร เพื่อให้ได้กระแสตัวเก็บประจุที่หักล้างกับกระแสรั่วไหลรวมได้พอดี สัญญาณข้างต้นทั้งหมดจะถูกบันทึกและแสดงผลผ่านทางหน้าจอของออสซิลโลสโคป อุปกรณ์บริดจ์ที่ถูกนำมาใช้งานถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3.5 คุณสมบัติของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบถูกให้ไว้ในภาคผนวก ข



รูปที่ 3.4 วงจรทดสอบสำหรับวัดกระแสรั่วไหลความต้านทาน

โดยที่: TX คือหม้อแปลงทดสอบ RD คือ ตัวต้านทานน้ำ  
VD คืออุปกรณ์ลดทอนแรงดัน V คือ โวลต์มิเตอร์  
osc คือ ออสซิลโลสโคป  $C_k$  ตัวเก็บประจุมาตรฐาน (Coupling capacitor)  
MOA คือ กัดักเสิร์จ

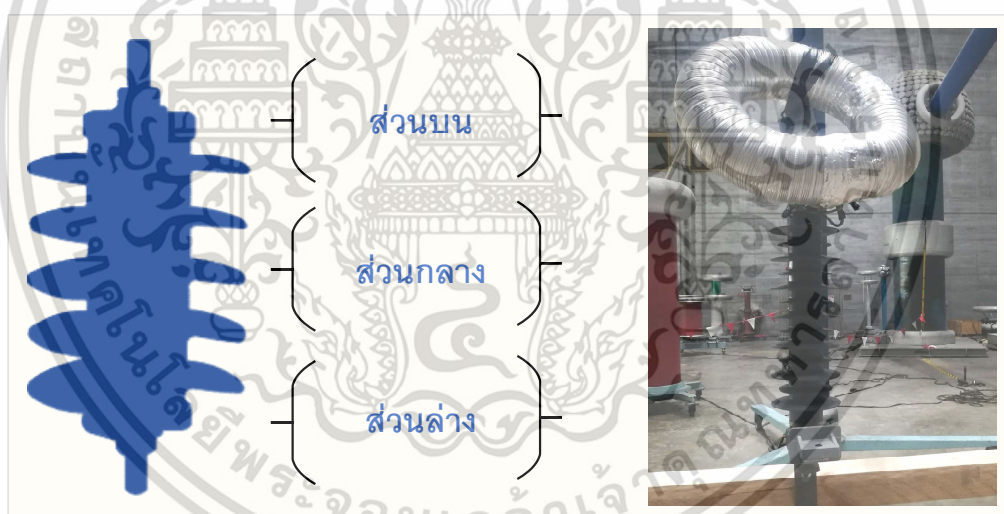


รูปที่ 3.5 อุปกรณ์บริดจ์ที่ใช้ในการทดสอบ (a) และวงจรสมมูลภายใน (b) ซึ่งแสดงอิมพีแดนซ์ปรับค่าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การวัดอุณหภูมิของกักดับเพลิง

หนึ่งในการเสื่อมสภาพของกักดับเพลิงที่เกิดขึ้นอยู่บ่อยครั้งเกิดในรูปแบบของการสูญเสียเสถียรภาพของอุณหภูมิ กล่าวคือเมื่อกักดับเพลิงได้รับพลังงานจากอิมพัลส์ฟ้าผ่า พลังงานส่วนหนึ่งจากการดีสชาร์จจะยังคงหลงเหลืออยู่ภายในและทำให้อุณหภูมิของตัวต้านทานวาริสเตอร์เพิ่มสูงขึ้น การแลกเปลี่ยนอุณหภูมิระหว่างตัวต้านทานและเปลือกโครงสร้างด้านนอกเป็นไปได้ด้วยวิธีธรรมชาติ แต่หากกักดับเพลิงได้รับกระแสที่สูงกว่าปกติของตัวเองหรือการได้รับพลังงานจากฟ้าผ่าซ้ำหลายครั้งทำให้พลังงานที่สะสมอยู่นั้นระบายออกไปไม่ได้ทันทีอาจจะนำไปสู่การสูญเสียเสถียรภาพของอุณหภูมิหรือเกิดรอยแตกได้ ดังนั้นในงานวิจัยฉบับนี้ซึ่งศึกษาผลของกระแสอิมพัลส์แบบต่อเนื่องที่มีต่อกักดับเพลิงในแง่มุมของกระแสรั่วไหล เพื่อที่จะยืนยันผลกระทบที่มีต่อกระแสรั่วไหลเพียงอย่างเดียว การวัดอุณหภูมิหลังจากที่กักดับเพลิงได้รับจึงจำเป็นเพื่อยืนยันว่าความเสียหายทางด้านการสูญเสียเสถียรภาพของอุณหภูมินั้นไม่ได้เกิดขึ้น โดยตำแหน่งที่อุณหภูมิถูกทำการวัดขึ้นมาประกอบด้วย 3 ตำแหน่งเพื่อที่จะให้ได้ข้อมูลของอุณหภูมิอย่างทั่วถึงโดยเสนอไว้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ตำแหน่งของกักดับเพลิงจุดวัดอุณหภูมิ

### 3.4 รายละเอียดและกระบวนการทดลอง

#### 3.4.1 การทดลองที่ 1

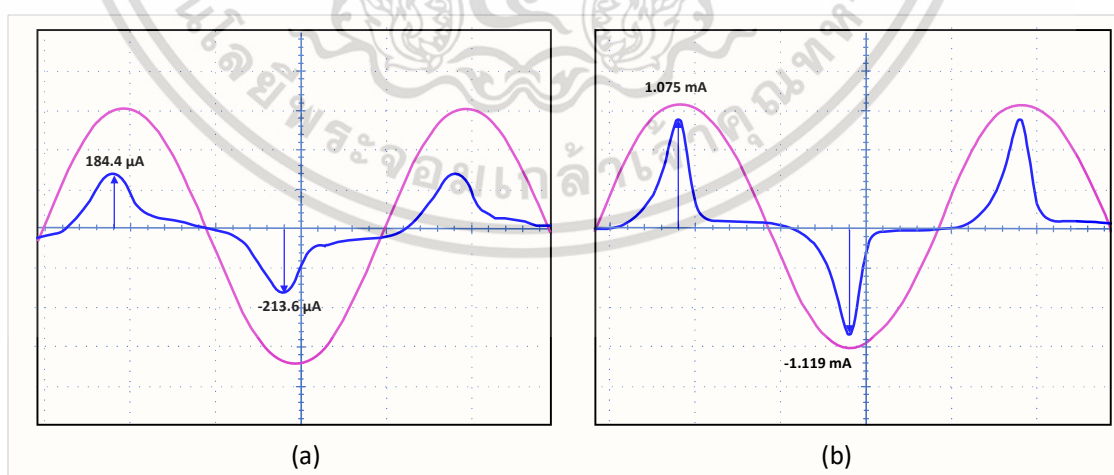
การทดลองที่ 1 เป็นการทดลองเพื่อศึกษารูปคลื่นกระแสรั่วไหลที่ไม่สมมาตรเนื่องด้วยอิทธิพลของการได้รับกระแสอิมพัลส์แบบต่อเนื่อง โดยก่อนหน้าที่จะเริ่มการทดลองนั้นตัวอย่างทดสอบถูกทำการวัดค่าตัวแปรอุณหภูมิขณะสภาวะคงตัวและกระแสรั่วความต้านทานเพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิงและใช้ในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเทียบต่อไป ข้อมูลที่ถูกวัดได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.3 อีกทั้งกระแสรั่วความต้านทานที่วัดได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3.7 และ รูปที่ 3.8 โดยตัวอย่างทดสอบที่ถูกนำมาใช้ในการศึกษานั้นมีจำนวนทั้งหมด 2 ตัว เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมความไม่สมมาตรของกระแสรั่ว ความไม่สมมาตรนั้นถูกแสดงออกในรูปแบบของส่วนต่างของค่ายอดกระแสรั่วความต้านทานหลังจากถูกหักลบกันกระแสรั่วตัวเก็บประจุเรียบร้อยแล้วรูปแบบในการนำเสนอถูกคำนวณออกมาในรูปของเปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ระดับแรงดันที่ใช้ในการป้อนเพื่อวัดกระแสรั่วนั้นมีด้วยกัน 2 ระดับแรงดันคือที่ 21kV และระดับแรงดันสำหรับแรงดันอ้างอิงกระแสรั่วที่ 1 mA (1mA-reference voltage)

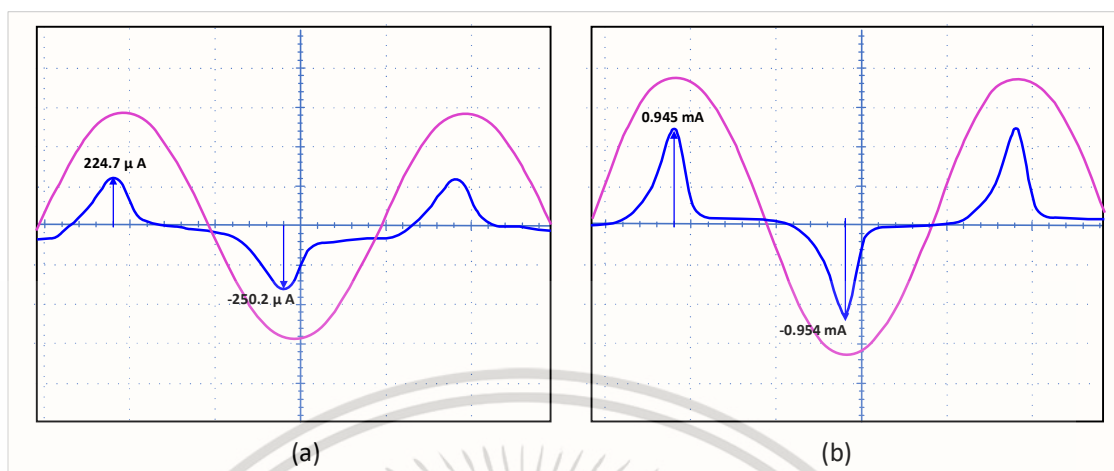
ตารางที่ 3.3 ข้อมูลอ้างอิงสำหรับตัวอย่างทดสอบกับดักเสิร์จผู้ผลิตที่ 1

ตัวแปร	ตัวอย่าง1.1	ตัวอย่าง1.2
อุณหภูมิ (ส่วนบน, ส่วนกลาง, ส่วนล่าง) [°C]	31.1, 32.3, 31.4	31.9, 32.1, 32
ค่ายอดกระแสรั่วความต้านทานที่ 21 kV (ค่ายอดฝั่งบวก/ค่ายอดฝั่งลบ)	184.4, -213.6 [μA]	224.7, -250.2 [μA]
เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างค่ายอด +/-	13.67 %	10.19 %
ค่ายอดกระแสรั่วความต้านทานที่แรงดันอ้างอิง กระแสรั่วที่ 1 mA (1mA-reference voltage) (ค่ายอดฝั่งบวก/ค่ายอดฝั่งลบ)	33.13 kV 1.075, -1.119 [mA]	32.85 kV 0.945, -0.954 [mA]
เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างค่ายอด +/-	1.20 %	0.94 %



รูปที่ 3.7 รูปคลื่นกระแสความต้านทานของกับดักเสิร์จตัวอย่างที่ 1.1 สำหรับแรงดันที่ 21kV (a) และแรงดันที่ 1mA (b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 รูปคลื่นกระแสความต้านทานของกัมมันตภาพรังสีตัวอย่างที่ 1.2 สำหรับแรงดันที่ 21 kV (a) และแรงดันที่ 1 mA (b)

หลังจากที่ค่าตัวแปรต่าง ๆ ได้ถูกวัดและบันทึกเพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับเปรียบเทียบแล้ว กระบวนการป้องกันกระแสไฟฟ้าต่อเนื่องจึงได้เริ่มต้นขึ้น การทดสอบถูกทำและควบคุมภายใต้สภาวะเงื่อนไขห้องทดสอบ มีการบันทึกอุณหภูมิโดยรอบ ความชื้นสัมพัทธ์ และความดันบรรยากาศไว้ที่ 31.8°C, 64.8 ppm และ 758 mmHg ตามลำดับ โดยรายละเอียดขั้นตอนการทดลองจะถูกอธิบายดังนี้

1. ตัวอย่างทดสอบที่ 1.1 จะถูกป้องกันด้วยกระแสไฟฟ้าต่อเนื่องรูปคลื่นมาตรฐานซ้ำบวก 8/20 μs เป็นจำนวน 10 ครั้ง แต่ละครั้งห่างกันเป็นเวลา 10 s ขณะที่กัมมันตภาพรังสีเกิดการดีสชาร์จพลังงานรูปคลื่นแรงดันคงเหลือที่ตกคร่อมกับตัวเก็บประจุและกระแสดีสชาร์จจะถูกทำการวัดและบันทึกค่า

2. เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการป้องกันกระแสไฟฟ้าต่อเนื่อง ความเสียหายภายนอกถูกตรวจสอบ อุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งถูกวัด รวมไปถึงกระแสรั่วไหลความต้านทานที่แรงดัน 21 kV และแรงดันอ้างอิงที่ 1 mA ตลอดจนรูปคลื่นกระแสที่แสดงผลถูกบันทึกค่าเก็บไว้

3. ตัวอย่างทดสอบถูกวางทิ้งเอาไว้ภายใต้สภาวะอุณหภูมิแวดล้อมเพื่อให้อุณหภูมิเย็นตัวลงตามธรรมชาติเป็นเวลา 1 วัน

4. หลังจากวางตัวอย่างทดสอบทิ้งไว้ 1 วัน อุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งถูกวัดอีกครั้ง รวมไปถึงกระแสรั่วไหลความต้านทานที่แรงดัน 21 kV และแรงดันอ้างอิงที่ 1 mA ตลอดจนรูปคลื่นกระแสที่แสดงผลถูกบันทึกค่าเก็บไว้ เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่าง

5. ตัวอย่างทดสอบที่ 1.1 จะถูกป้องกันด้วยกระแสไฟฟ้าต่อเนื่องรูปคลื่นมาตรฐานซ้ำลบ 8/20 μs เป็นจำนวน 5 ครั้ง แต่ละครั้งห่างกันเป็นเวลา 10 s ขณะที่กัมมันตภาพรังสีเกิดการดีสชาร์จพลังงานรูปคลื่นแรงดันคงเหลือที่ตกคร่อมกับตัวเก็บประจุและกระแสดีสชาร์จจะถูกทำการวัดและบันทึกค่า

6. เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการป้อนกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าต่อเนื่อง ความเสียหายภายนอกถูกตรวจสอบ อุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งถูกวัด รวมไปถึงกระแสรั่วไหลความต้านทานที่แรงดัน 21 kV และแรงดันอ้างอิงที่ 1 mA ตลอดจนรูปคลื่นกระแสที่แสดงผลถูกบันทึกค่าเก็บไว้

7. ในตัวอย่างทดสอบที่ 1.2 นั้นจะถูกทำซ้ำเช่นเดียวกันกับตัวอย่างทดสอบที่ 1 ตามข้อที่ 1-6

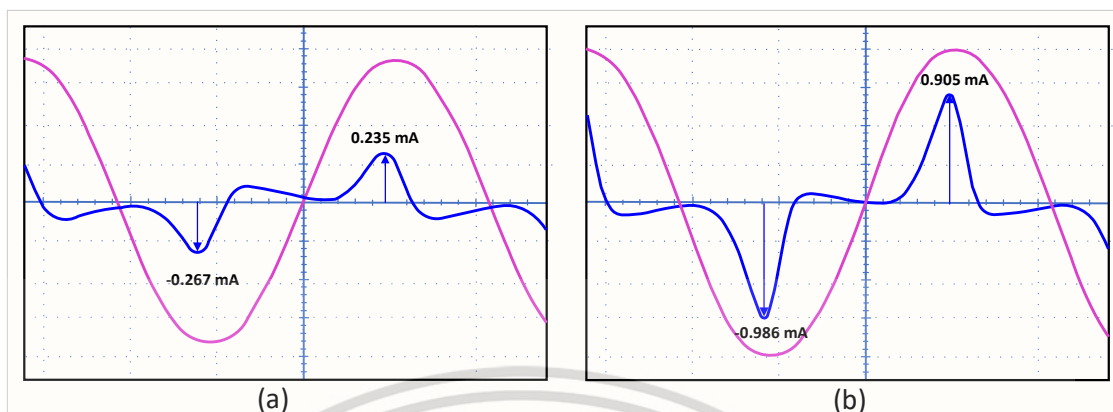
### 3.4.2 การทดลองที่ 2

การทดลองที่ 2 เป็นการทดลองเพื่อศึกษาผลของรูปคลื่นกระแสรั่วไหลที่ไม่สมมาตรเนื่องด้วยอิทธิพลของของกระแสอิมพัลส์แบบต่อเนื่องที่มีช่วงของกระแสต่างกัน การทดลองนี้จะถูกศึกษาต่อจากการทดลองที่ 1 ซึ่งเป็นการศึกษาผลของช่วงกระแสอิมพัลส์โดยมีสมมุติฐานว่าความไม่สมมาตรของรูปคลื่นกระแสรั่วไหลนั้นสามารถเกิดได้จากการป้อนกระแสอิมพัลส์แบบต่อเนื่องไม่ว่าจะเป็นช่วงบวกหรือลบ แต่พฤติกรรมความไม่สมมาตรนั้นจะต่างกันออกไปหากมีอิทธิพลจากผลของช่วงเข้ามาเกี่ยวข้อง ในทำนองเดียวกันก่อนหน้าที่จะเริ่มการทดลอง ตัวอย่างทดสอบถูกทำการวัดค่าตัวแปรอุณหภูมิขณะสภาวะคงตัวและกระแสรั่วความต้านทานเพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิงและใช้ในการเปรียบเทียบต่อไป ข้อมูลที่วัดได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.4 อีกทั้งตัวอย่างกระแสรั่วความต้านทานที่วัดได้ของตัวอย่างที่ 2.1 และ 2.3 ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3.9 - รูปที่ 3.10 โดยในการทดลอง นี้จำนวนตัวอย่างทดสอบนั้นจะถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มละ 2 ตัว

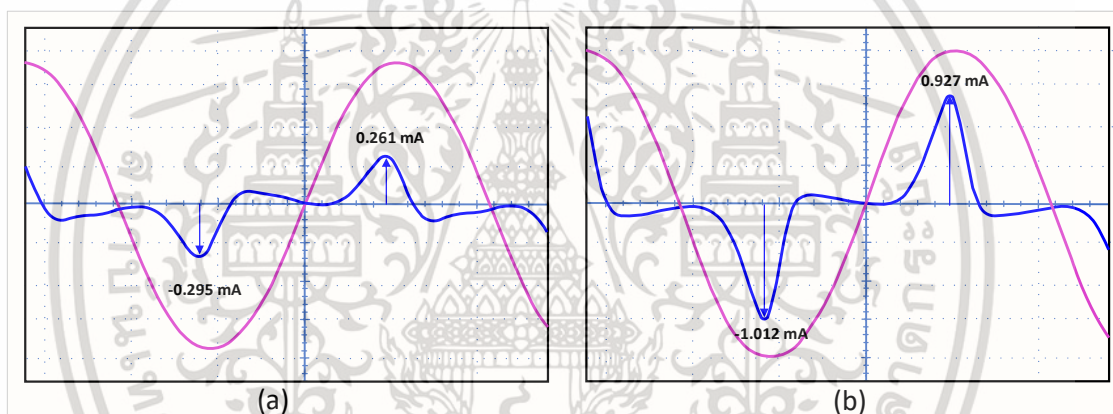
ตารางที่ 3.3 ข้อมูลอ้างอิงสำหรับตัวอย่างทดสอบกับดักเสิร์จผู้ผลิตที่ 2

ตัวแปร	กลุ่มที่ 1		กลุ่มที่ 2	
	ตัวอย่าง2.1	ตัวอย่าง2.2	ตัวอย่าง2.3	ตัวอย่าง2.4
อุณหภูมิ (ส่วนบน, ส่วนกลาง, ส่วนล่าง) [°C]	28.8, 28.8, 28.9	28.8, 28.8, 28.9	28.8, 28.8, 28.9	28.8, 28.8, 28.9
ค่ายอดกระแสรั่วความต้านทานที่ 24 kV (ค่ายอดฝั่งบวก/ค่ายอดฝั่งลบ)	0.235 -0.267 mA	0.277 -0.321 mA	0.261 -0.295 mA	0.249, -0.291 mA
เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างค่ายอด +/-	11.99%	13.71%	11.53%	14.43%
ค่ายอดกระแสรั่วความต้านทานที่แรงดัน อ้างอิงกระแสรั่วที่ 1 mA (1mA- reference voltage) (ค่ายอดฝั่งบวก/ค่ายอดฝั่งลบ)	0.905, -0.986 mA [25.9 kV]	0.901, -1.005 mA [25.9 kV]	0.927, -1.012 mA [25.8 kV]	0.905, -1.048A [25.9 kV]
เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างค่ายอด +/-	8.22%	10.34%	8.40%	9.92%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 รูปคลื่นกระแสความต้านทานของกัปดักเสิร์จตัวอย่างที่ 2.1 สำหรับแรงดันที่ 24kV (a) และแรงดันที่ 1mA (b)



รูปที่ 3.10 รูปคลื่นกระแสความต้านทานของกัปดักเสิร์จตัวอย่างที่ 2.3 สำหรับแรงดันที่ 24kV (a) และแรงดันที่ 1mA (b)

หลังจากที่ค่าตัวแปรต่าง ๆ ได้ถูกวัดและบันทึกเพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับเปรียบเทียบแล้ว กระบวนการป้อนกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าต่อเนื่องจึงได้เริ่มต้นขึ้น การทดสอบถูกทำและควบคุมภายใต้สถานะเงื่อนไขห้องทดสอบ มีการบันทึกอุณหภูมิโดยรอบ ความชื้นสัมพัทธ์ และความดันบรรยากาศไว้ที่ 31.5°C, 84.4 ppm และ 756 mmHg ตามลำดับ โดยรายละเอียดขั้นตอนการทดลองจะถูกอธิบายดังนี้

1. ตัวอย่างทดสอบที่ 2.1 และ 2.2 ถูกป้อนด้วยกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าต่อเนื่องรูปคลื่นมาตรฐาน **ซั๋วบว** 8/20 $\mu$ s เป็นจำนวน 5 ครั้ง แต่ละครั้งห่างกันเป็นเวลา 60 s ขณะที่กัปดักเสิร์จเกิดการดีสชาร์จพลังงาน รูปคลื่นแรงดันคงเหลือที่ตกคร่อมกัปดักเสิร์จและกระแสดีสชาร์จจะถูกทำการวัดและบันทึกค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. 1. ตัวอย่างทดสอบที่ 2.3 และ 2.4 ถูกป้อนด้วยกระแสไฟฟ้าต่อเนื่องรูปคลื่นมาตรฐาน **ซ้ำลบ**  $8/20\mu\text{s}$  เป็นจำนวน 5 ครั้ง แต่แต่ละครั้งห่างกันเป็นเวลา 60 s ขณะที่กับดักเสิร์จเกิดการดิสชาร์จพลังงาน รูปคลื่นแรงดันคงเหลือที่ตกคร่อมกับดักเสิร์จและกระแสดิสชาร์จจะถูกทำการวัดและบันทึกค่า

3. เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการป้อนกระแสไฟฟ้าต่อเนื่อง ความเสียหายภายนอกถูกตรวจสอบ อุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งถูกวัด รวมไปถึงกระแสรั่วไหลความต้านทานที่แรงดัน 24 kV และแรงดันอ้างอิงที่ 1 mA ตลอดจนรูปคลื่นกระแสที่แสดงผลถูกบันทึกค่าเก็บไว้ กระบวนการนี้จะถูกทำกับตัวอย่างทดสอบทั้ง 4 ตัว

4. ตัวอย่างทดสอบถูกวางทิ้งเอาไว้ภายใต้สภาวะอุณหภูมิแวดล้อมเพื่อให้อุณหภูมิเย็นตัวลงตามธรรมชาติเป็นเวลา 1 วัน

5. ตัวอย่างทดสอบที่ 2.1 และ 2.2 ถูกป้อนด้วยกระแสไฟฟ้าต่อเนื่องรูปคลื่นมาตรฐาน **ซ้ำบวก**  $8/20\mu\text{s}$  เป็นจำนวน 5 ครั้ง แต่แต่ละครั้งห่างกันเป็นเวลา 60 s ขณะที่กับดักเสิร์จเกิดการดิสชาร์จพลังงาน รูปคลื่นแรงดันคงเหลือที่ตกคร่อมกับดักเสิร์จและกระแสดิสชาร์จจะถูกทำการวัดและบันทึกค่า

6. ตัวอย่างทดสอบที่ 2.3 และ 2.4 ถูกป้อนด้วยกระแสไฟฟ้าต่อเนื่องรูปคลื่นมาตรฐาน **ซ้ำลบ**  $8/20\mu\text{s}$  เป็นจำนวน 5 ครั้ง แต่แต่ละครั้งห่างกันเป็นเวลา 60 s ขณะที่กับดักเสิร์จเกิดการดิสชาร์จพลังงาน รูปคลื่นแรงดันคงเหลือที่ตกคร่อมกับดักเสิร์จและกระแสดิสชาร์จจะถูกทำการวัดและบันทึกค่า

7. เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการป้อนกระแสไฟฟ้าต่อเนื่อง ความเสียหายภายนอกถูกตรวจสอบ อุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งถูกวัด รวมไปถึงกระแสรั่วไหลความต้านทานที่แรงดัน 24 kV และแรงดันอ้างอิงที่ 1 mA ตลอดจนรูปคลื่นกระแสที่แสดงผลถูกบันทึกค่าเก็บไว้ กระบวนการนี้จะถูกทำกับตัวอย่างทดสอบทั้ง 4 ตัว

8. ตัวอย่างทดสอบถูกวางทิ้งเอาไว้ภายใต้สภาวะอุณหภูมิแวดล้อมเพื่อให้อุณหภูมิเย็นตัวลงตามธรรมชาติเป็นเวลา 1 วัน

9. ตัวอย่างทดสอบที่ 2.1 และ 2.2 ถูกป้อนด้วยกระแสไฟฟ้าต่อเนื่องรูปคลื่นมาตรฐาน **ซ้ำลบ**  $8/20\mu\text{s}$  เป็นจำนวน 5 ครั้ง แต่แต่ละครั้งห่างกันเป็นเวลา 60 s ขณะที่กับดักเสิร์จเกิดการดิสชาร์จพลังงาน รูปคลื่นแรงดันคงเหลือที่ตกคร่อมกับดักเสิร์จและกระแสดิสชาร์จจะถูกทำการวัดและบันทึกค่า

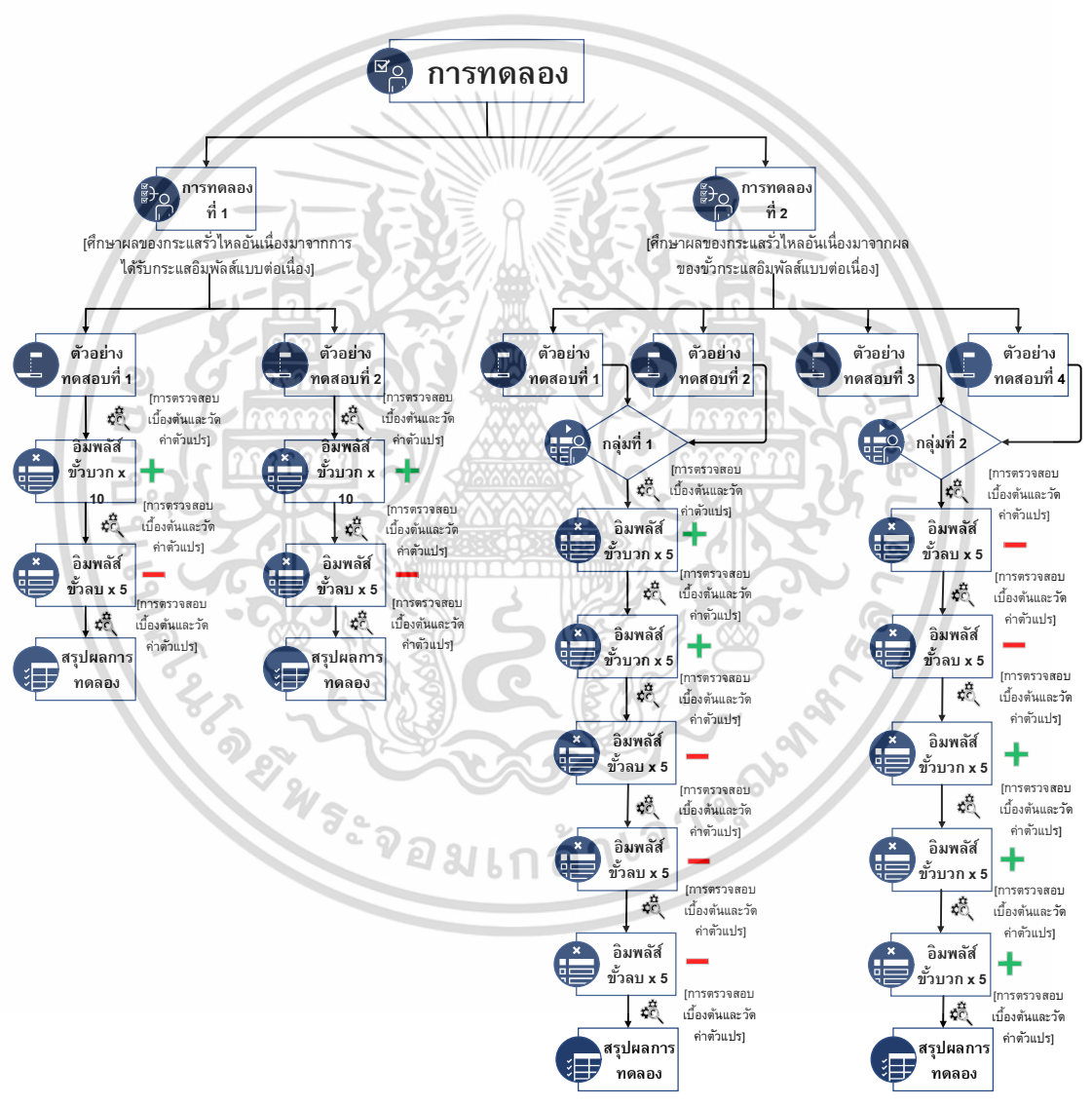
10. ตัวอย่างทดสอบที่ 2.3 และ 2.4 ถูกป้อนด้วยกระแสไฟฟ้าต่อเนื่องรูปคลื่นมาตรฐาน **ซ้ำบวก**  $8/20\mu\text{s}$  เป็นจำนวน 5 ครั้ง แต่แต่ละครั้งห่างกันเป็นเวลา 60 s ขณะที่กับดักเสิร์จเกิดการดิสชาร์จพลังงาน รูปคลื่นแรงดันคงเหลือที่ตกคร่อมกับดักเสิร์จและกระแสดิสชาร์จจะถูกทำการวัดและบันทึกค่า

11. เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการป้อนกระแสไฟฟ้าต่อเนื่อง ความเสียหายภายนอกถูกตรวจสอบ อุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งถูกวัด รวมไปถึงกระแสรั่วไหลความต้านทานที่แรงดัน 24 kV และ

แรงดันอ้างอิงที่ 1 mA ตลอดจนรูปคลื่นกระแสที่แสดงผลถูกบันทึกค่าเก็บไว้ กระบวนการนี้จะถูกทำกับตัวอย่างทดสอบทั้ง 4 ตัว

12. กระบวนการที่ 8 - 12 นั้นถูกทำซ้ำอีกทั้งหมด 2 ครั้ง

ทั้งนี้โดยแกรมแสดงรายละเอียดภาพรวมของการทดสอบของการทดลองที่ 1 และ 2 อย่างย่อ ได้ถูกแสดงไว้ดังตะแกรมด้านล่างนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

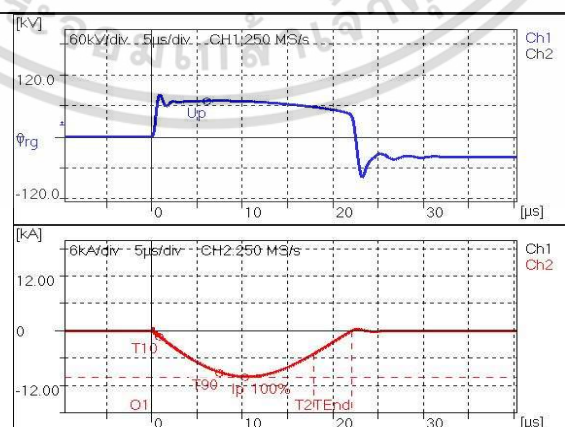
### ผลการทดสอบ

ในบทนี้จะแสดงผลการทดสอบทั้ง 2 การทดลอง ค่าตัวแปรต่าง ๆ เช่น รูปคลื่นกระแสรั่วไหล ความต้านทาน อุดหนุมิ ค่าแรงดันคงเหลือของกับดักเสิร์จขณะเกิดการดิสชาร์จ จนกระทั่งการแปลผลในส่วนของความไม่สมมาตรซึ่งเป็นจุดประสงค์หลักของการศึกษาในวิจัยนี้เช่นกัน นอกจากนี้ผลการทดลองที่ได้ทำการบันทึกเป็นข้อมูลดิบ จะถูกนำมาเรียบเรียงใหม่และสรุป โดยลำดับการนำเสนอจะถูกเรียงตามลำดับการทดลองที่กล่าวไว้ในบทที่ 3

#### 4.1 ผลการทดลองที่ 1

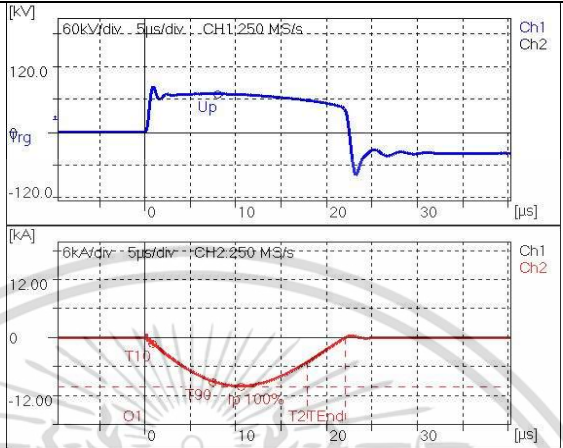
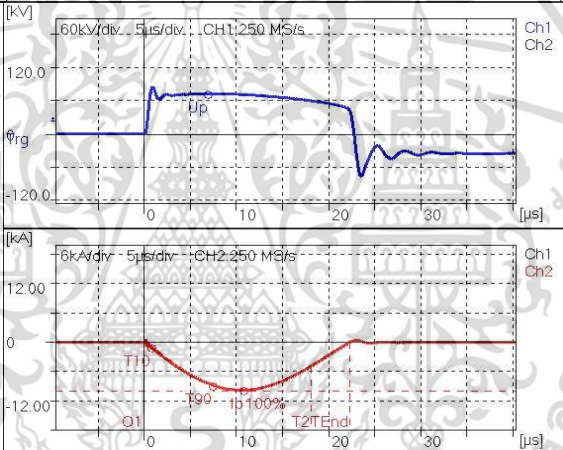
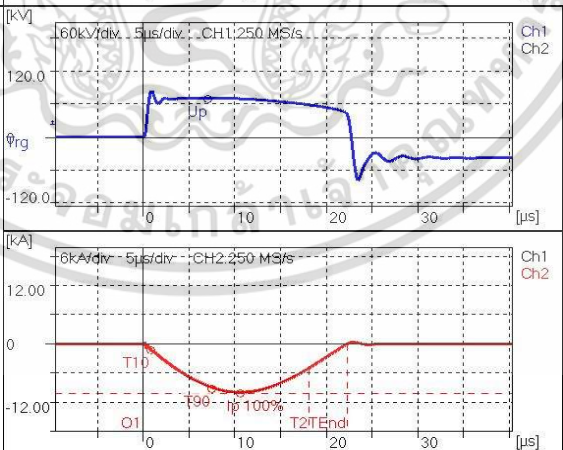
ในขั้นตอนแรกของการทดลองที่ 1 ตัวอย่างทดสอบที่ 1.1 และ 1.2 ถูกป้อนด้วยกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าต่อเนื่องรูปคลื่นมาตรฐานซั้วบวก 8/20 $\mu$ s เป็นจำนวน 10 ครั้ง โดยในขณะที่เกิดการดิสชาร์จของกับดักเสิร์จ รูปคลื่นของกระแสและแรงดันคงเหลือที่ตกคร่อมกับดักเสิร์จได้ถูกวัดและบันทึก ดังแสดงในตารางที่ 4.1 กราฟสีน้ำเงินถูกแทนด้วยรูปคลื่นแรงดันคงเหลือ และกราฟสีแดงถูกแทนด้วยรูปคลื่นกระแสดิสชาร์จ ในตารางจะแสดงตัวอย่างแคปรูปคลื่นครั้งที่ 5 และ 10 เท่านั้นโดยค่ายอดและรูปคลื่นของแรงดันคงเหลือถูกใช้เป็นเกณฑ์หนึ่งของการทดสอบประจำ (Routine test) เช่นกัน ซึ่งรูปคลื่นสามารถบอกได้ถึง การเกิดความเสียหายภายในหากรูปคลื่นมีการตัด (Chop)

ตารางที่ 4.1 รูปคลื่นแรงดันคงเหลือและกระแสดิสชาร์จที่ทำการบันทึกของตัวอย่างทดสอบที่ 1.1 และ 1.2 หลังจากได้รับกระแสอิมพัลส์ต่อเนื่องซั้วบวกจำนวน 10 ครั้ง

ตัวอย่างทดสอบ	ครั้งที่	รูปคลื่นแรงดันคงเหลือและกระแสดิสชาร์จ	รายละเอียด
ตัวอย่างทดสอบที่ 1.1	5		Ch1: Voltage Up = 71.086 kV Ch2: Current Ip = -10.097 kA T1 = 8.329 $\mu$ s T2 = 17.96 $\mu$ s TEnd = 22.11 $\mu$ s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1(ต่อ) รูปคลื่นแรงดันคงเหลือและกระแสสวิตช์ที่ทำการบันทึกของตัวอย่างทดสอบที่ 1.1 และ 1.2 หลังจากได้รับกระแสอิมพัลส์ต่อเนื่องซ้ำวกจำนวน 10 ครั้ง

ตัวอย่างทดสอบที่ 1.1	3		<b>Ch1: Voltage</b> $U_p = 71.301 \text{ kV}$ <b>Ch2: Current</b> $I_p = -10.061 \text{ kA}$ $T_1 = 8.332 \mu\text{s}$ $T_2 = 17.94 \mu\text{s}$ $T_{\text{End}} = 22.11 \mu\text{s}$
ตัวอย่างทดสอบที่ 2.1	5		<b>Ch1: Voltage</b> $U_p = 73.790 \text{ kV}$ <b>Ch2: Current</b> $I_p = -9.8679 \text{ kA}$ $T_1 = 8.392 \mu\text{s}$ $T_2 = 18.13 \mu\text{s}$ $T_{\text{End}} = 22.32 \mu\text{s}$
ตัวอย่างทดสอบที่ 2.1	10		<b>Ch1: Voltage</b> $U_p = 72.172 \text{ kV}$ <b>Ch2: Current</b> $I_p = -10.010 \text{ kA}$ $T_1 = 8.417 \mu\text{s}$ $T_2 = 18.15 \mu\text{s}$ $T_{\text{End}} = 22.33 \mu\text{s}$

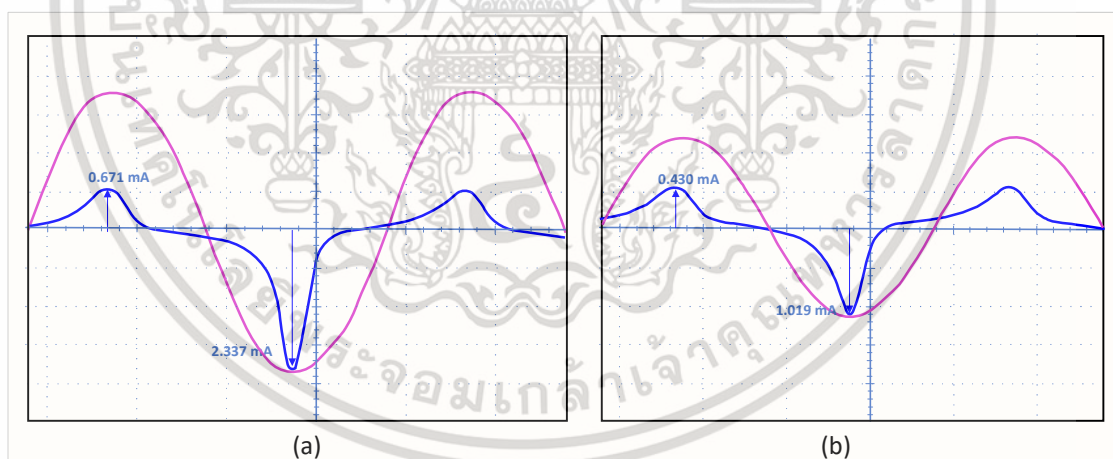
หลังจากที่ตัวอย่างทดสอบทั้งสองได้รับกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าและความเสียหายภายนอกถูกตรวจสอบ พบว่าไม่มีความเสียหายภายนอกที่ตรวจพบกับดักเสิร์จทั้งสองยังคงอยู่ในสภาพที่ใช้งานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิที่ถูกวัดเพื่อวิเคราะห์ผล รวมไปถึงกระแสรั่วไหลความต้านทานที่แรงดัน 21 kV และแรงดันอ้างอิงที่ 1 mA แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 และ รูปที่ 4.1 - รูปที่ 4.2

**ตารางที่ 4.2** ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ถูกทำการวัดของตัวอย่างทดสอบที่ 1.1 และ 1.2 หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าต่อเนื่องซ้ำบวกจำนวน 10 ครั้ง

ตัวแปร	ตัวอย่าง1.1	ตัวอย่าง1.2
อุณหภูมิ (ส่วนบน, ส่วนกลาง, ส่วนล่าง) [°C]	48, 111.4, 75.7	66.3, 90.9, 45.9
ค่ายอดกระแสรั่วความต้านทานที่ 21 kV (ค่ายอดฝั่งบวก/ค่ายอดฝั่งลบ)	0.671, -2.337 [mA]	0.713, -2.618 [mA]
เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างค่ายอด +/-	71.25%	72.73%
ค่ายอดกระแสรั่วความต้านทานที่แรงดันอ้างอิง กระแสรั่วที่ 1 mA (ค่ายอดฝั่งบวก/ค่ายอดฝั่งลบ)	27.743 kV 0.430mA, -1.019 [mA]	28.75 kV 0.447 mA, -1.147 [mA]
เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างค่ายอด +/-	57.80%	60.94%

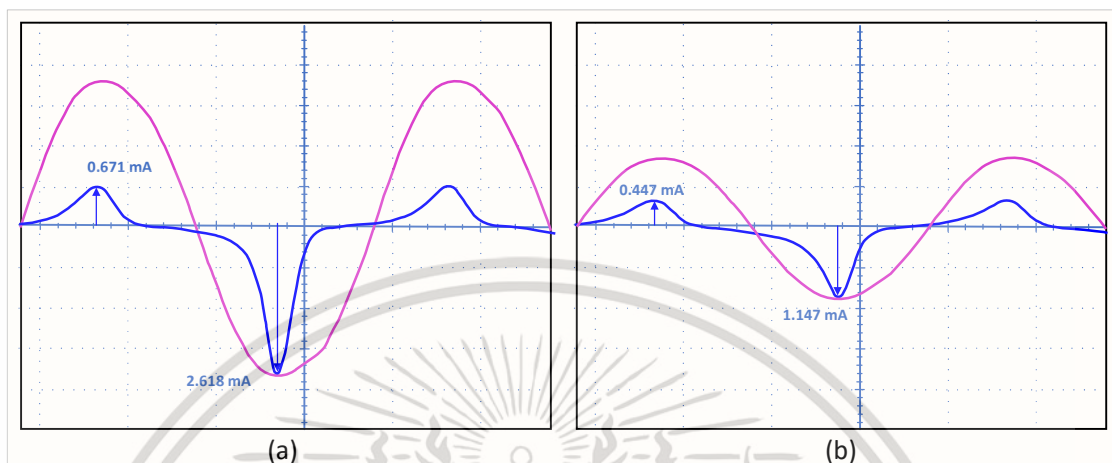


**รูปที่ 4.1** รูปคลื่นกระแสความต้านทานของกับดักเสิร์จตัวอย่างที่ 1.1 สำหรับแรงดันที่ 21 kV (a) และแรงดันที่ 1mA (b) หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสอิมพัลส์ต่อเนื่องซ้ำบวกจำนวน 10 ครั้ง

หลังจากนั้นตัวอย่างทดสอบถูกวางทิ้งไว้ 1 วันเพื่อให้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการได้รับพลังงานจากกระแสอิมพัลส์นั้นเย็นตัวลงตามธรรมชาติ การกระทำนี้เป็นการเลียนแบบเหตุการณ์ตามธรรมชาติเมื่อกับดักเสิร์จจัดสสารกระแสฟ้าผ่าและเหตุการณ์สงบลง โดยเมื่อครบเวลาแล้ว รูปคลื่นกระแสรั่วไหลความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านทานถูกทำการวัดอีกครั้งเพื่อศึกษาพฤติกรรมของความไม่สมมาตรของกระแสรั่วไหลว่าพฤติกรรมนั้นเป็นพฤติกรรมที่เกิดขึ้นเพียงชั่วคราวหรือถาวร โดยผลการวัดได้แสดงในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.2 รูปคลื่นกระแสความต้านทานของกับดักเสิร์จตัวอย่างที่ 1.2 สำหรับแรงดันที่ 21 kV a) และแรงดันที่ 1mA (b) หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสอิมพัลส์ต่อเนื่องชั่วคราวจำนวน 10 ครั้ง

ตารางที่ 4.3 ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ถูกทำการวัดของตัวอย่างทดสอบที่ 1.1 และ 1.2 หลังจากถูกวางทิ้งไว้ให้เย็นตัวลงตามธรรมชาติเป็นเวลา 1 วัน

ตัวแปร	ตัวอย่าง 1.1	ตัวอย่าง 1.2
อุณหภูมิ (ส่วนบน, ส่วนกลาง, ส่วนล่าง) [°C]	32.3, 33.6, 31.9	31.8, 31.6, 31.3
ค่ายอดกระแสรั่วความต้านทานที่ 21 kV (ค่ายอดฝั่งบวก/ค่ายอดฝั่งลบ)	0.361, -0.867 [mA]	0.444, -1.439 [mA]
เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างค่ายอด +/-	58.34%	69.15%
ค่ายอดกระแสรั่วความต้านทานที่แรงดันอ้างอิง กระแสรั่วที่ 1 mA (ค่ายอดฝั่งบวก/ค่ายอดฝั่งลบ)	21.1 kV 0.396 mA, -1.113 [mA]	21.0 kV 0.394 mA, -1.04 [mA]
เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างค่ายอด +/-	64.33%	62.12%

ขั้นตอนต่อมาตัวอย่างทดสอบทั้งสองถูกป้อนด้วยกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าต่อเนื่องรูปคลื่นมาตรฐานชั่วลบ  $8/20\mu\text{s}$  จำนวน 5 ครั้ง และรูปคลื่นแรงดันคงเหลือที่ตกคร่อมกับดักเสิร์จและกระแสดิซชาร์จจะถูกทำการวัดและบันทึกค่า (แสดงในตารางที่ 4.4) โดยจะแสดงแค่ตัวอย่างรูปคลื่นเฉพาะ 3 ครั้งเท่านั้น

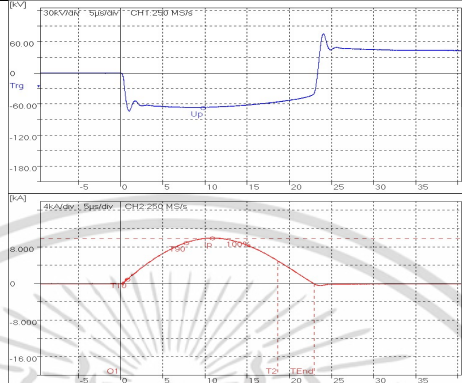
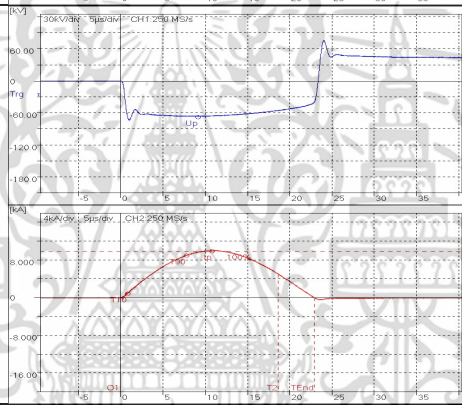
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

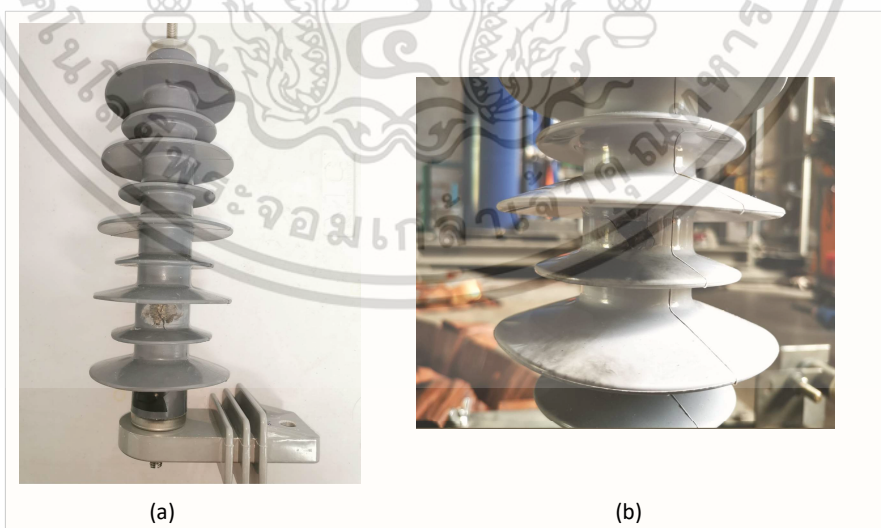
ตารางที่ 4.4 รูปคลื่นแรงดันคงเหลือและกระแสดีสชาร์จที่ทำการบันทึกของตัวอย่างทดสอบที่ 1.1 และ 1.2 หลังจากได้รับกระแสอิมพัลส์ต่อเนื่องซ้ำจำนวน 5 ครั้ง

ตัวอย่างทดสอบ	ครั้งที่	รูปคลื่นแรงดันคงเหลือและกระแสดีสชาร์จ	รายละเอียด
ตัวอย่างทดสอบที่ 1.1	1		<b>Ch1: Voltage</b> Up = -65.33 kV <b>Ch2: Current</b> Ip = 10.10 kA T1 = 8.717 μs T2 = 18.64 μs TEnd = 22.97 μs
ตัวอย่างทดสอบที่ 1.1	2		<b>Ch1: Voltage</b> Up = -65.91 kV <b>Ch2: Current</b> Ip = 10.06 kA T1 = 8.663 μs T2 = 18.64 μs TEnd = 22.95 μs
ตัวอย่างทดสอบที่ 2.1	1		<b>Ch1: Voltage</b> Up = -67.29 kV <b>Ch2: Current</b> Ip = -9.951 kA T1 = 8.651 μs T2 = 18.59 μs TEnd = 22.90 μs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4(ต่อ) รูปคลื่นแรงดันคงเหลือและกระแสดีสชาร์จที่ทำการบันทึกของตัวอย่างทดสอบที่ 1.1 และ 1.2 หลังจากได้รับกระแสอิมพัลส์ต่อเนื่องซ้ำจำนวน 5 ครั้ง

<p>ตัวอย่างทดสอบที่ 2.1</p>	<p>3</p>		<p><b>Ch1: Voltage</b> Up = -67.08 kV</p> <p><b>Ch2: Current</b> Ip = 9.979 kA T1 = 8.656 μs T2 = 18.60 μs TEnd = 22.94 μs</p>
<p>ตัวอย่างทดสอบที่ 2.1</p>	<p>5</p>		<p><b>Ch1: Voltage</b> Up = -66.54 kV</p> <p><b>Ch2: Current</b> Ip = 10.02 kA T1 = 8.666 μs T2 = 18.62 μs TEnd = 22.94 μs</p>



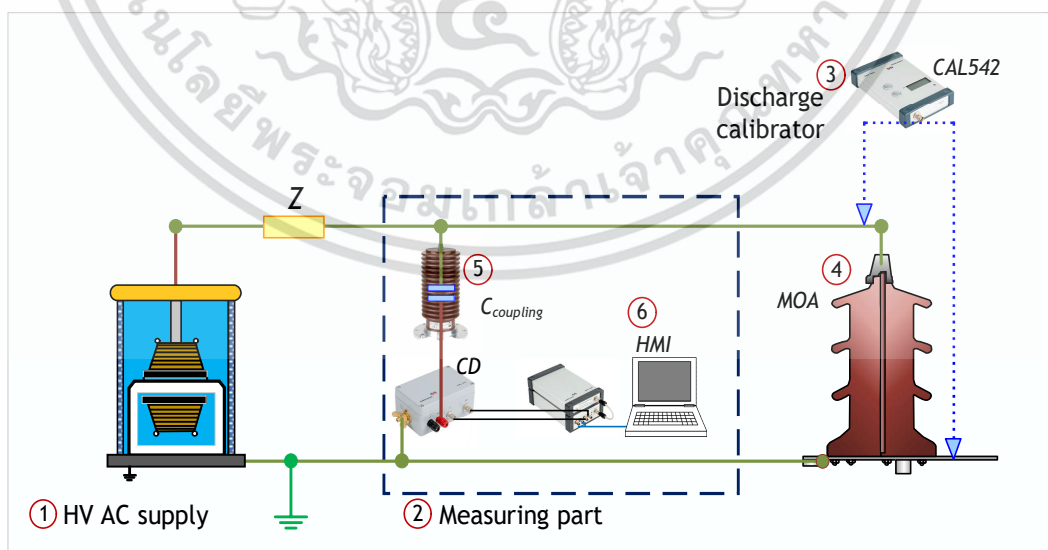
รูปที่ 4.3 กับดักเสิร์จตัวอย่างทดสอบที่ 1.1 ที่เกิดการระเบิดหลังจากป้อนกระแสอิมพัลส์ต่อเนื่องซ้ำได้ 2 ครั้ง (a) และตำแหน่งที่เกิดการระเบิดออก (b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขั้นตอนของการป้อนกระแสิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วลบแบบต่อเนื่องจำนวน 5 ครั้ง ตัวอย่างทดสอบที่ 1.1 ได้เกิดการระเบิดขึ้นหลังจากป้อนกระแสิมพัลส์ไปแล้ว 2 ครั้ง ความเสียหายทางกายภาพถูกตรวจพบว่ามีการแตกของฉนวนห่อหุ้มด้านนอกดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.3 การศึกษารูปคลื่นกระแสรั่วไหลที่ไม่สมมาตรยังคงดำเนินต่อไป เนื่องจากพฤติกรรมของกัปดักเสิร์จที่เกิดความเสียหายไปแล้วและยังคงติดตั้งอยู่ในระบบไฟฟ้ายังคงเป็นข้อมูลที่น่าสนใจและเป็นประโยชน์อย่างมากอยู่

การวัดกระแสรั่วไหลของกัปดักเสิร์จจำเป็นต้องจ่ายแรงดันให้ตกคร่อมกัปดักเสิร์จ ดังนั้นการคำนึงถึงความปลอดภัยทั้งด้านของผู้ทำการทดสอบและด้านทรัพย์สินของเครื่องมือการทดสอบจึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่ถูกนำมาพิจารณา ก่อนหน้าที่จะทำการทดสอบ การวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนถูกนำมาเป็นหัวข้อทดสอบหนึ่งก่อนหน้าโดยมีจุดประสงค์หลัก ๆ ทั้งหมด 2 ข้อคือ การทดลองป้อนแรงดันที่เพื่อดูพฤติกรรมของกัปดักเสิร์จที่เกิดการระเบิดภายใต้สนามไฟฟ้า AC ว่าสามารถทนต่อความเครียดนั้นได้หรือไม่ ประการที่สองคือการประเมินพฤติกรรมของ PD ที่ระดับแรงดันที่ต้องการจะวัดว่าเกิดขึ้นมากน้อยเพียงใด หากที่ระดับแรงดันใดที่เกิด PD ขึ้น และ PD เหล่านั้นเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ นั้นถูกแสดงให้เห็นว่าที่แรงดันนั้นเมื่อทิ้งเอาไว้เป็นช่วงเวลาหนึ่งอาจจะเกิดการเบรคดาวน์ตามมาได้ ก็จะไม่ทำการทดสอบที่แรงดันนั้น เมื่อทดลองป้อนแรงดันตกคร่อมกัปดักเสิร์จตัวอย่างทดสอบที่ 1.1 การวัด PD แบบดั้งเดิม (Conventional measurement) ถูกใช้ในการทดสอบครั้งนี้ วงจรที่ใช้ในการวัดถูกแสดงในรูปที่ 4.4 โดยที่อุปกรณ์แต่ละตัวประกอบด้วย

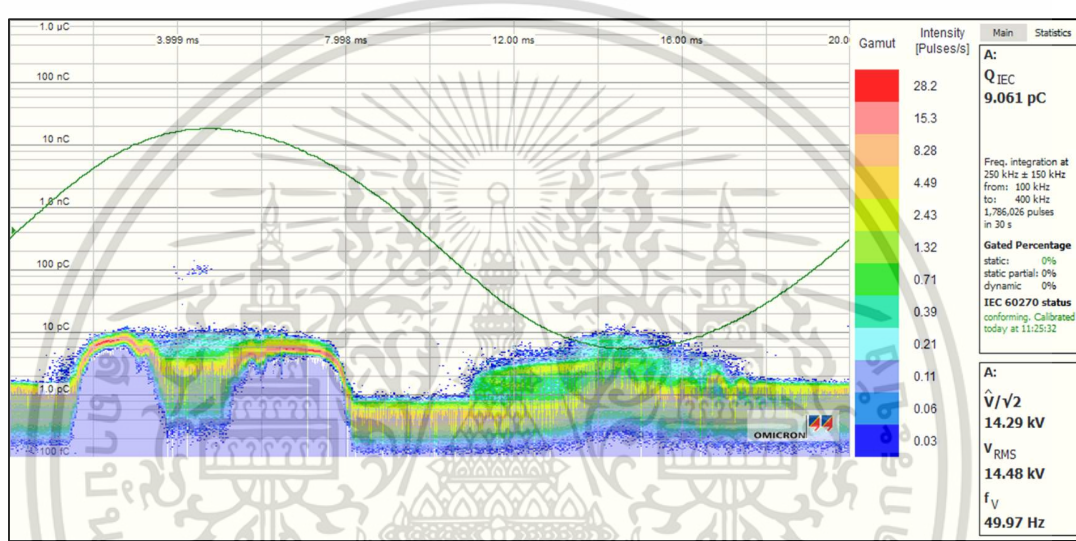
1. แหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับ
2. ส่วนของการวัด PD
3. อุปกรณ์ปรับเทียบปรุจมาตรฐาน
4. ตัวอย่างทดสอบกัปดักเสิร์จ



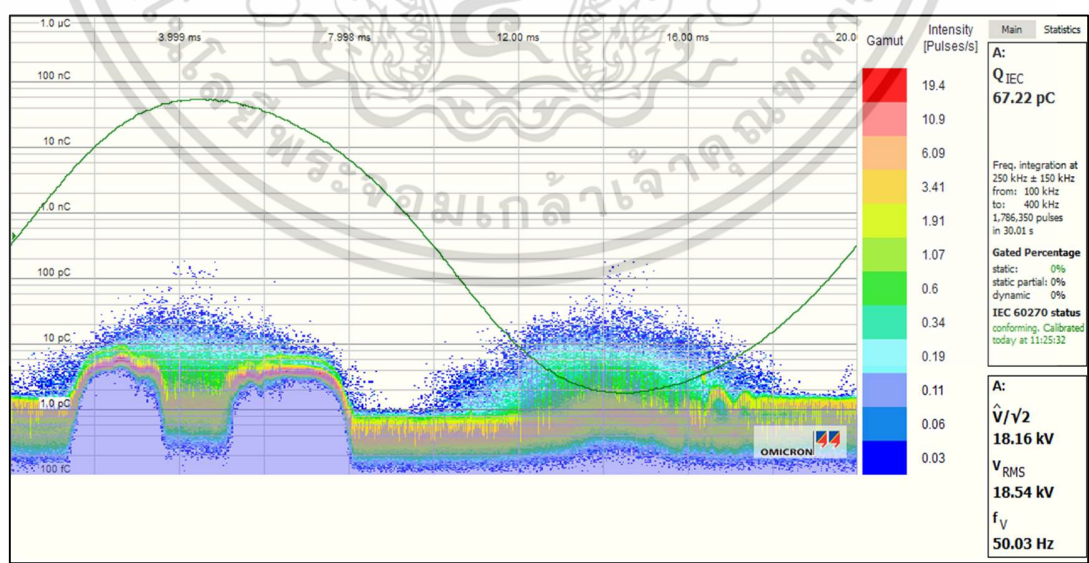
รูปที่ 4.4 วงจรวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge measurement circuit)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อการทดสอบวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนถูกทำขึ้นพบว่าเกิดPD ที่เกิดขึ้นเป็นชนิดของโคโรน่า (Corona discharge) ที่เกิดขึ้นทางฝั่งของแรงดันสูง ระดับแรงดันเริ่มเกิดของดิสชาร์จบางส่วน(Partial discharge inception voltage) เกิดขึ้นที่แรงดัน 14.48 kV (รูปที่ 4.5) นอกจากนี้ผู้ทำการทดสอบได้ขึ้นแรงดันไปจนกระทั่ง 18.54 kV (รูปที่ 4.6) พบว่าค่าประจุของการเกิดดิสชาร์จนั้นมีค่ามาก และประจุที่เกิดขึ้นเพิ่มจำนวนของพัลส์มากขึ้นเมื่อคงแรงดันเอาไว้ จึงสามารถสรุปได้ว่าการบ่อนแรงดันเพื่อหาค่ากระแสรั่วไหลความต้านทานนั้นไม่สามารถบ่อนเกินที่ระดับ 18 kV ได้เนื่องจากจะนำไปสู่ความเสียหาย



รูปที่ 4.5 แรงดันเริ่มการของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของตัวอย่างทดสอบที่ 1.1



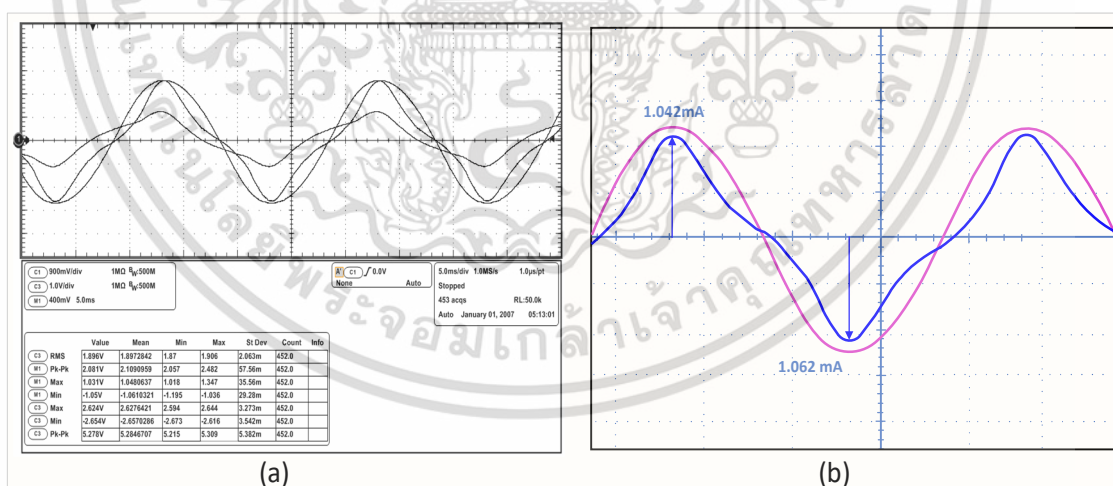
รูปที่ 4.6 การเกิดดิสชาร์จบางส่วนของตัวอย่างทดสอบที่ 1.1 ที่แรงดัน 18.54 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนั้นตัวอย่างทดสอบทั้งสองถูกนำมาเข้ากระบวนการวัดค่าอุณหภูมิใน และกระแสรั่วไหล ความต้านทานที่แรงดัน 21 kV และแรงดันอ้างอิงที่ 1 mA อีกครั้ง ซึ่งผลของค่ายอดกระแสรูป และ รูปคลื่นกระแสรั่วไหลความต้านทานถูกนำเสนอในตารางที่ 4.5 และ รูปที่ 4.7 - รูปที่ 4.8

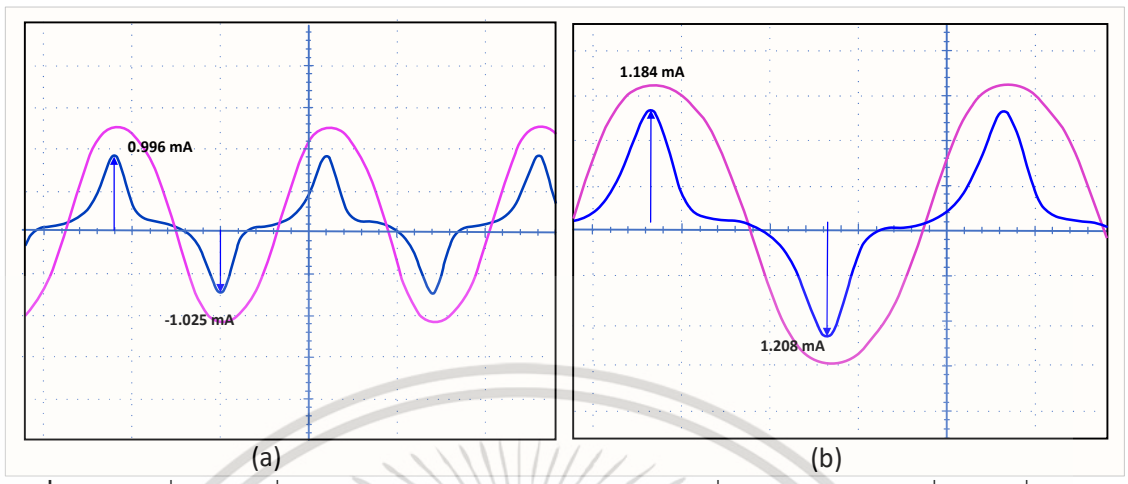
**ตารางที่ 4.5** ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ถูกทำการวัดของตัวอย่างทดสอบที่ 1.1 และ 1.2 หลังจากถูกป้อนด้วย กระแสอิมพัลส์ต่อเนื่องชั่วลบ

ตัวแปร	ตัวอย่าง1.1	ตัวอย่าง1.2
อุณหภูมิ (ส่วนบน, ส่วนกลาง, ส่วนล่าง) [°C]	38, 43, 40	45, 52, 31
ค่ายอดกระแสรั่วความต้านทานที่ 21 kV (ค่ายอดฝั่งบวก/ค่ายอดฝั่งลบ)	ไม่มีข้อมูล	1.184, -1.208
เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างค่ายอด +/-	ไม่มีข้อมูล	1.99%
ค่ายอดกระแสรั่วความต้านทานที่แรงดันอ้างอิง กระแสรั่วที่ 1 mA (1mA-reference voltage) (ค่ายอดฝั่งบวก/ค่ายอดฝั่งลบ)	18 kV 1.042, -1.062 [mA]	20.7 kV 0.995, -1.025 [mA]
เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างค่ายอด +/-	1.92%	2.83%



**รูปที่ 4.7** รูปคลื่นกระแสรั่วไหลตัวอย่างที่ 1.1 ณ แรงดันที่ 1mA โดยแสดงกระแสรั่วไหลรวม (a) และ กระแสรั่วไหลความต้านทาน (b) หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสอิมพัลส์ชั่วลบจำนวน 2 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลความต้านทานของตัวอย่างทดลองที่ 1.2 สำหรับแรงดันที่แรงดันที่ 1mA (a) และแรงดันที่ 21 kV (b) หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสพัลส์ซ้ำจำนวน 5 ครั้ง

4.2 ผลการทดลองที่ 2

ในขั้นตอนแรกของการทดลองที่ 2 เริ่มต้นด้วยการป้อนกระแสพัลส์ฟ้าผ่าต่อเนื่องซ้ำจำนวน 5 ครั้ง ให้กับตัวอย่างทดสอบที่ 2.1 และ 2.2 ในขณะเดียวกันตัวอย่างทดสอบที่ 2.3 และ 2.4 ถูกป้อนด้วยกระแสพัลส์ฟ้าผ่าต่อเนื่องซ้ำจำนวน 5 ครั้งเช่นกัน รูปคลื่นแรงดันคงเหลือที่ตกคร่อมกับดักเสิร์จและกระแสดีสชาร์จจะถูกทำการวัดและบันทึกค่าและแสดงในตารางที่ 4.6 ซึ่งในตารางจะแสดงเพียงตัวอย่างของรูปคลื่นบางครั้งที่เท่านั้น

ตารางที่ 4.6 รูปคลื่นแรงดันคงเหลือและกระแสดีสชาร์จที่ทำการบันทึกของตัวอย่างทดสอบที่ 2.1 ถึง 2.4 หลังจากได้รับกระแสพัลส์ต่อเนื่องจำนวน 5 ครั้ง (ครั้งที่ 1)

ตัวอย่างทดสอบ	ครั้งที่	รูปคลื่นแรงดันคงเหลือและกระแสดีสชาร์จ	รายละเอียด
ตัวอย่างทดสอบที่ 2.1	3		<p>Ch1: Voltage Up = 66.897 kV</p> <p>Ch2: Current Ip = -10.459 kA</p> <p>T1 = 8.426 μs T2 = 18.06 μs TEnd = 22.08 μs</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6(ต่อ) รูปคลื่นแรงดันคองเทิลและกระแสสวิตซ์ที่ทำการบันทึกของตัวอย่างทดสอบที่ 2.1 ถึง 2.4 หลังจากได้รับกระแสอิมพัลส์ต่อเนื่องจำนวน 5 ครั้ง (ครั้งที่ 1)

ตัวอย่างทดสอบ	ครั้งที่	รูปคลื่นแรงดันคองเทิลและกระแสสวิตซ์	รายละเอียด
ตัวอย่างทดสอบที่ 2.1	5		<b>Ch1: Voltage</b> $U_p = 67.194 \text{ kV}$ <b>Ch2: Current</b> $I_p = -10.443 \text{ kA}$ $T_1 = 8.409 \text{ } \mu\text{s}$ $T_2 = 18.07 \text{ } \mu\text{s}$ $T_{\text{End}} = 22.09 \text{ } \mu\text{s}$
ตัวอย่างทดสอบที่ 2.2	3		<b>Ch1: Voltage</b> $U_p = 66.937 \text{ kV}$ <b>Ch2: Current</b> $I_p = -10.411 \text{ kA}$ $T_1 = 8.434 \text{ } \mu\text{s}$ $T_2 = 18.05 \text{ } \mu\text{s}$ $T_{\text{End}} = 22.09 \text{ } \mu\text{s}$
ตัวอย่างทดสอบที่ 2.2	5		<b>Ch1: Voltage</b> $U_p = 67.316 \text{ kV}$ <b>Ch2: Current</b> $I_p = -10.265 \text{ kA}$ $T_1 = 8.394 \text{ } \mu\text{s}$ $T_2 = 18.06 \text{ } \mu\text{s}$ $T_{\text{End}} = 22.09 \text{ } \mu\text{s}$

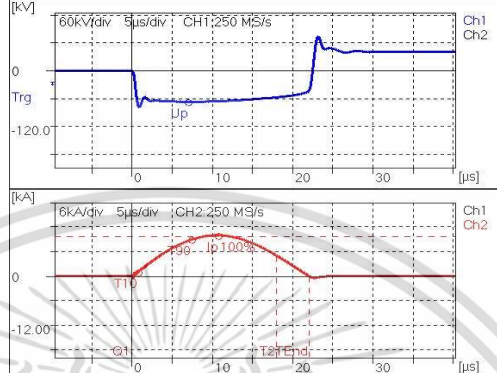
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6(ต่อ) รูปคลื่นแรงดันคงเหลือและกระแสดีสชาร์จที่ทำการบันทึกของตัวอย่างทดสอบที่ 2.1 ถึง 2.4 หลังจากได้รับกระแสอิมพัลส์ต่อเนื่องจำนวน 5 ครั้ง (ครั้งที่ 1)

ตัวอย่างทดสอบ	ครั้งที่	รูปคลื่นแรงดันคงเหลือและกระแสดีสชาร์จ	รายละเอียด
ตัวอย่างทดสอบที่ 2.3	3		<b>Ch1: Voltage</b> Up = -67.286 kV <b>Ch2: Current</b> Ip = 10.123 kA T1 = 8.339 μs T2 = 17.91 μs TEnd = 21.95 μs
ตัวอย่างทดสอบที่ 2.3	5		<b>Ch1: Voltage</b> Up = -67.911 kV <b>Ch2: Current</b> Ip = 10.120 kA T1 = 8.338 μs T2 = 17.91 μs TEnd = 21.95 μs
ตัวอย่างทดสอบที่ 2.4	3		<b>Ch1: Voltage</b> Up = -66.907 kV <b>Ch2: Current</b> Ip = 10.059 kA T1 = 8.404 μs T2 = 18.04 μs TEnd = 22.08 μs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.6(ต่อ)** รูปคลื่นแรงดันคงเหลือและกระแสดีสชาร์จที่ทำการบันทึกของตัวอย่างทดสอบที่ 2.1 ถึง 2.4 หลังจากได้รับกระแสอิมพัลส์ต่อเนื่องจำนวน 5 ครั้ง (ครั้งที่ 1)

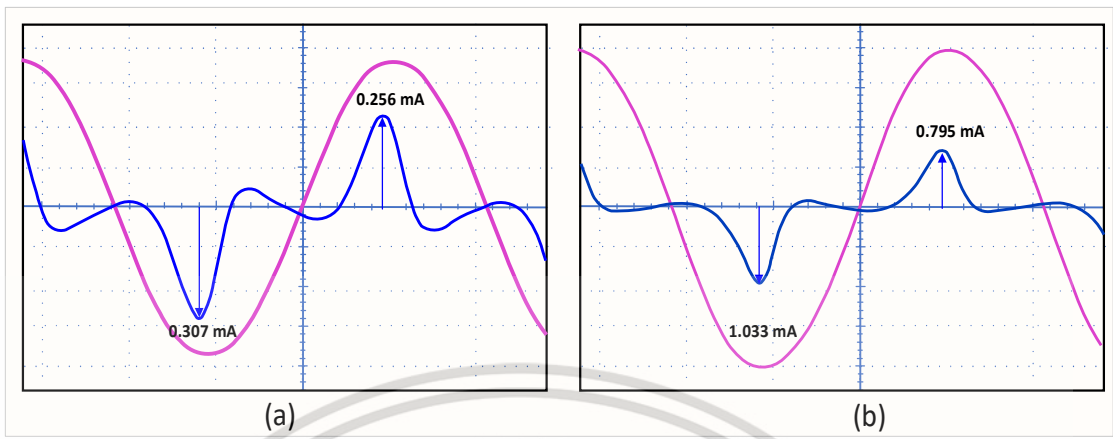
ตัวอย่างทดสอบ	ครั้งที่	รูปคลื่นแรงดันคงเหลือและกระแสดีสชาร์จ	รายละเอียด
ตัวอย่างทดสอบที่ 2.4	5		<b>Ch1: Voltage</b> $U_p = -67.204 \text{ kV}$ <b>Ch2: Current</b> $I_p = 10.039 \text{ kA}$ $T_1 = 8.417 \mu\text{s}$ $T_2 = 18.04 \mu\text{s}$ $T_{\text{End}} = 22.10 \mu\text{s}$

หลังจากกระบวนการป้อนกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าต่อเนื่องเสร็จสิ้น พบว่าไม่มีความเสียหายภายนอก ถูกตรวจสอบ อุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งถูกวัด รวมไปถึงกระแสรั่วไหลความต้านทานที่แรงดัน 24 kV และแรงดันอ้างอิงที่ 1 mA ตลอดจนรูปคลื่นกระแสที่แสดงผลถูกบันทึกค่าเก็บไว้ ดังแสดงในตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.9 - รูปที่ 4.12

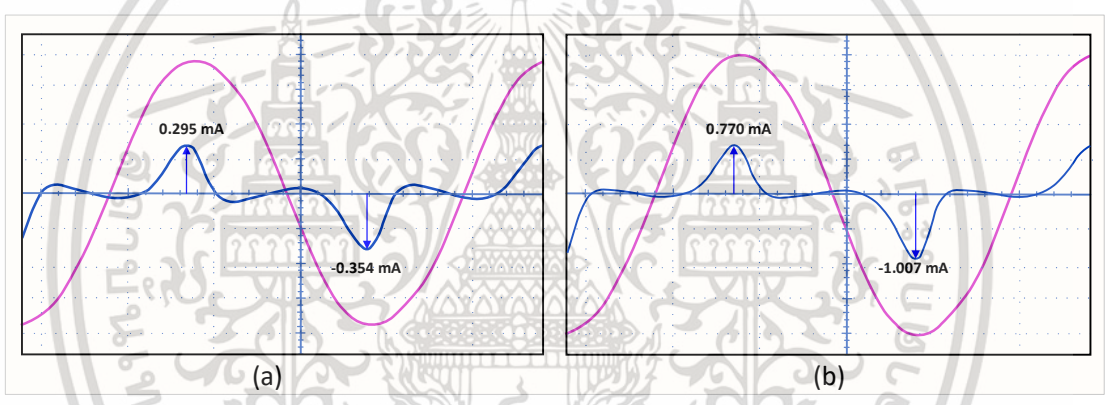
**ตารางที่ 4.7** ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ถูกทำการวัดของตัวอย่างทดสอบที่ 2.1 - 2.4 หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสอิมพัลส์ต่อเนื่องจำนวน 5 ครั้ง (ครั้งที่ 1)

ตัวแปร	กลุ่มที่ 1		กลุ่มที่ 2	
	ตัวอย่าง 2.1	ตัวอย่าง 2.2	ตัวอย่าง 2.3	ตัวอย่าง 2.4
อุณหภูมิ (ส่วนบน, ส่วนกลาง, ส่วนล่าง) [°C]	56.0, 58.2, 46.0	56.2, 56.6, 47.5	54.3, 55.5, 47.0	54.5, 57.5, 49.0
ค่ายอดกระแสรั่วความต้านทานที่ 24 kV (ค่ายอดฝั่งบวก/ค่ายอดฝั่งลบ)	0.256 -0.307 mA	0.295 -0.354 mA	0.259 -0.259 mA	0.224, -0.237 mA
เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างค่ายอด +/-	16.61%	16.67%	0%	5.49%
ค่ายอดกระแสรั่วความต้านทานที่แรงดัน อ้างอิงกระแสรั่วที่ 1 mA (ค่ายอดฝั่งบวก/ค่ายอดฝั่งลบ)	0.795 -1.033mA [25.7kV]	0.770 -1.007mA [25.7 kV]	1.034 -0.885 mA [25.9kV]	1.070, -0.906 mA [26kV]
เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างค่ายอด +/-	23.04%	23.54%	-16.84%	-18.10%

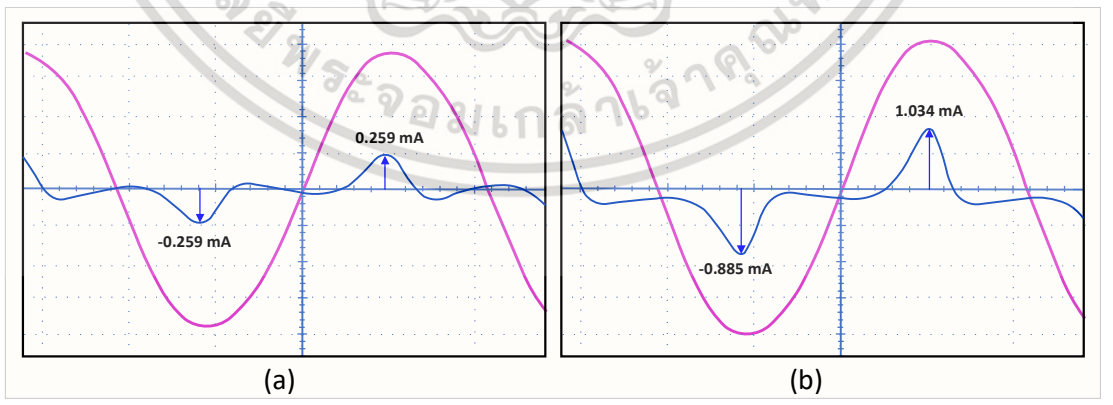
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลความต้านทานของตัวอย่างทดลองที่ 2.1 สำหรับแรงดันที่แรงดันที่ 1mA (a) และแรงดันที่ 24 kV (b) หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสพัลส์ชั่ววอกจำนวน 5 ครั้ง

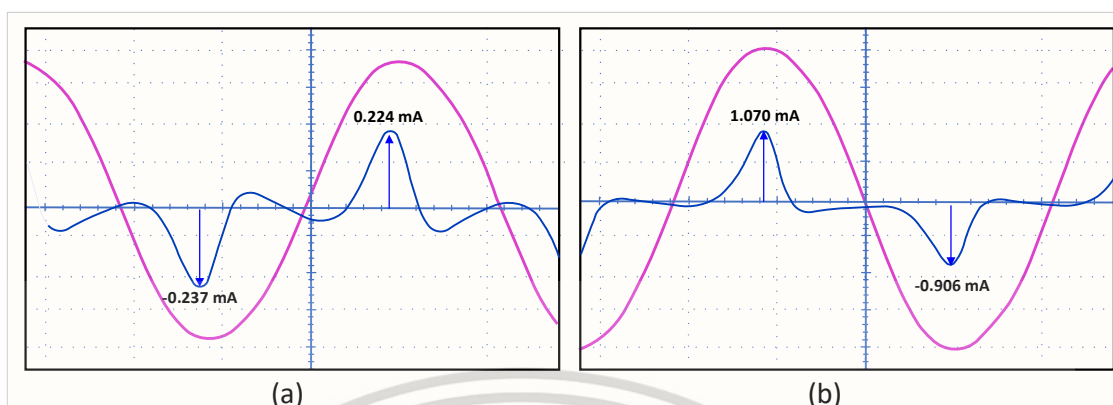


รูปที่ 4.10 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลความต้านทานของตัวอย่างทดลองที่ 2.2 สำหรับแรงดันที่แรงดันที่ 1mA (a) และแรงดันที่ 24 kV (b) หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสพัลส์ชั่ววอกจำนวน 5 ครั้ง



รูปที่ 4.11 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลความต้านทานของตัวอย่างทดลองที่ 2.3 สำหรับแรงดันที่แรงดันที่ 1mA (a) และแรงดันที่ 24 kV (b) หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสพัลส์ชั่ววอกจำนวน 5 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลความต้านทานของตัวอย่างทดลองที่ 2.4 สำหรับแรงดันที่แรงดันที่ 1mA (a) และแรงดันที่ 24 kV (b) หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสพัลส์ขั้วลบจำนวน 5 ครั้ง

หลังจากนั้นตัวอย่างทดสอบที่ 2.1 และ 2.2 ถูกป้อนด้วยกระแสพัลส์ไฟฟ้าต่อเนื่องรูปคลื่นมาตรฐาน **ขั้วบวก** ซึ่งเป็นขั้วที่ตรงข้ามกับขั้นตอนที่ 1 เป็นจำนวน 5 ครั้ง ตัวอย่างทดสอบที่ 2.3 และ 2.4 ถูกป้อนด้วยกระแสพัลส์ไฟฟ้าต่อเนื่องรูปคลื่นมาตรฐาน **ขั้วลบ** เป็นจำนวน 5 ครั้งเช่นกัน รูปคลื่นแรงดันคงเหลือที่ตกคร่อมกับดักเสิร์จและกระแสดีสชาร์จจะถูกทำการวัดและบันทึกค่าแสดงในตารางที่ 4.8

เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการป้อนกระแสพัลส์ไฟฟ้าต่อเนื่องครั้งที่ 2 แล้ว การวัดค่าตัวแปรต่าง ๆ เพื่อวิเคราะห์ผลถูกทำขึ้น ได้แก่อุณหภูมิในแต่ละตำแหน่ง กระแสรั่วไหลความต้านทานที่แรงดัน 24 kV และแรงดันอ้างอิงที่ 1 mA จากการตรวจสอบสภาพภายนอกของกับดักเสิร์จทั้ง 4 ตัว พบว่ายังคงอยู่ในสภาพปกติ ไม่มีรอยแตกร้าวหรือรอยระเบิดรอบนอก ประกอบกับรูปคลื่นแรงดันคงเหลือของตัวอย่างทดสอบนั้นไม่มีการปรากฏของรูปคลื่นที่ตัด โดยผลของความไม่สมมาตร รวมทั้งกระแสคายอดของกระแสรั่วไหลความต้านทานถูกบันทึกไว้ในตารางที่ 4.9 พร้อมทั้งรูปคลื่นกระแสรั่วไหลที่บันทึกได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4.13 - รูปที่ 4.16

ตารางที่ 4.8 รูปคลื่นแรงดันคงเหลือและกระแสดีสชาร์จที่ทำการบันทึกของตัวอย่างทดสอบที่ 2.1 ถึง 2.4 หลังจากได้รับกระแสไอพัสต่อเนื่องจำนวน 5 ครั้ง (ครั้งที่ 2)

ตัวอย่างทดสอบ	ครั้งที่	รูปคลื่นแรงดันคงเหลือและกระแสดีสชาร์จ	รายละเอียด
ตัวอย่างทดสอบที่ 2.1	3		<b>Ch1: Voltage</b> Up = 66.897 kV  <b>Ch2: Current</b> Ip = -10.459 kA T1 = 8.426 μs T2 = 18.06 μs TEnd = 22.08 μs
ตัวอย่างทดสอบที่ 2.1	5		<b>Ch1: Voltage</b> Up = 67.357 kV  <b>Ch2: Current</b> Ip = -10.431 kA T1 = 8.408 μs T2 = 18.06 μs TEnd = 22.09 μs
ตัวอย่างทดสอบที่ 2.2	3		<b>Ch1: Voltage</b> Up = 67.562 kV  <b>Ch2: Current</b> Ip = -10.430 kA T1 = 8.428 μs T2 = 18.05 μs TEnd = 22.09 μs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8(ต่อ) รูปคลื่นแรงดันคงเหลือและกระแสดีสชาร์จที่ทำการบันทึกของตัวอย่างทดสอบที่ 2.1 ถึง 2.4 หลังจากได้รับกระแสอิมพัลส์ต่อเนื่องจำนวน 5 ครั้ง (ครั้งที่ 2)

ตัวอย่างทดสอบ	ครั้งที่	รูปคลื่นแรงดันคงเหลือและกระแสดีสชาร์จ	รายละเอียด
ตัวอย่างทดสอบที่ 2.2	5		<b>Ch1: Voltage</b> $U_p = 67.439 \text{ kV}$ <b>Ch2: Current</b> $I_p = -10.357 \text{ kA}$ $T_1 = 8.403 \mu\text{s}$ $T_2 = 18.06 \mu\text{s}$ $T_{\text{End}} = 22.08 \mu\text{s}$
ตัวอย่างทดสอบที่ 2.3	3		<b>Ch1: Voltage</b> $U_p = -67.993 \text{ kV}$ <b>Ch2: Current</b> $I_p = 10.070 \text{ kA}$ $T_1 = 8.328 \mu\text{s}$ $T_2 = 17.89 \mu\text{s}$ $T_{\text{End}} = 21.93 \mu\text{s}$
ตัวอย่างทดสอบที่ 2.3	5		<b>Ch1: Voltage</b> $U_p = -66.907 \text{ kV}$ <b>Ch2: Current</b> $I_p = 10.059 \text{ kA}$ $T_1 = 8.404 \mu\text{s}$ $T_2 = 18.04 \mu\text{s}$ $T_{\text{End}} = 22.08 \mu\text{s}$
ตัวอย่างทดสอบที่ 2.4	3		<b>Ch1: Voltage</b> $U_p = -67.204 \text{ kV}$ <b>Ch2: Current</b> $I_p = 10.039 \text{ kA}$ $T_1 = 8.417 \mu\text{s}$ $T_2 = 18.04 \mu\text{s}$ $T_{\text{End}} = 22.10 \mu\text{s}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

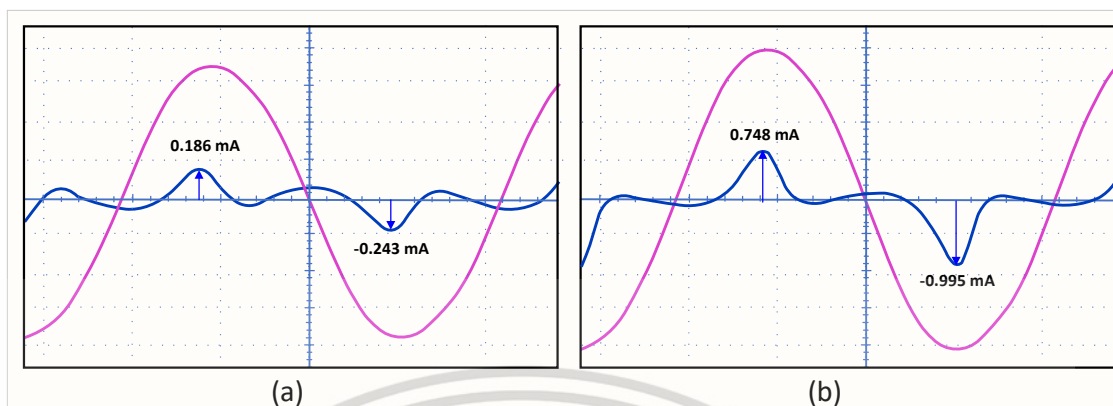
ตารางที่ 4.8(ต่อ) รูปคลื่นแรงดันคงเหลือและกระแสดีสชาร์จที่ทำการบันทึกของตัวอย่างทดสอบที่ 2.1 ถึง 2.4 หลังจากได้รับกระแสอิมพัลส์ต่อเนื่องจำนวน 5 ครั้ง (ครั้งที่ 2)

ตัวอย่างทดสอบ	ครั้งที่	รูปคลื่นแรงดันคงเหลือและกระแสดีสชาร์จ	รายละเอียด
ตัวอย่างทดสอบที่ 2.4	5		<b>Ch1: Voltage</b> $U_p = -67.286 \text{ kV}$ <b>Ch2: Current</b> $I_p = 10.045 \text{ kA}$ $T_1 = 8.407 \mu\text{s}$ $T_2 = 18.04 \mu\text{s}$ $T_{\text{End}} = 22.10 \mu\text{s}$

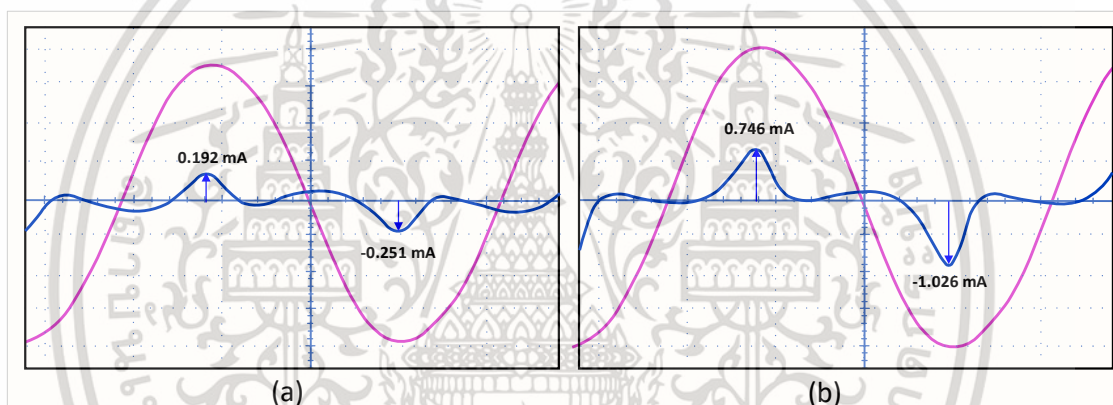
ตารางที่ 4.9 ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ถูกทำการวัดของตัวอย่างทดสอบที่ 2.1 - 2.4 หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสอิมพัลส์ต่อเนื่องจำนวน 5 ครั้ง (ครั้งที่ 2)

ตัวแปร	กลุ่มที่ 1		กลุ่มที่ 2	
	ตัวอย่าง 2.1	ตัวอย่าง 2.2	ตัวอย่าง 2.3	ตัวอย่าง 2.4
อุณหภูมิ (ส่วนบน, ส่วนกลาง, ส่วนล่าง) [°C]	58.0, 59.6, 43.9	63.1, 64.5, 52.3	54.8, 58.3, 50.0	61.7, 60.3, 45.2
ค่ายอดกระแสรั่วความต้านทานที่ 24 kV (ค่ายอดฝั่งบวก/ค่ายอดฝั่งลบ)	0.186, - 0.243 [mA]	0.192, - 0.251 [mA]	0.304, - 0.31 [mA]	0.297, - 0.306 [mA]
เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างค่ายอด +/-	23.46%	23.51%	1.94%	2.94%
ค่ายอดกระแสรั่วความต้านทานที่แรงดัน อ้างอิงกระแสรั่วที่ 1 mA (ค่ายอดฝั่งบวก/ค่ายอดฝั่งลบ)	0.748, 0.998 [mA] [26 kV]	0.746, - 1.026 [mA] [26 kV]	1.059, - 0.929 [mA] [25.9kV]	1.043, - 0.916 [mA] [26.2 kV]
เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างค่ายอด +/-	25.05%	27.29%	-13.99%	-13.86%

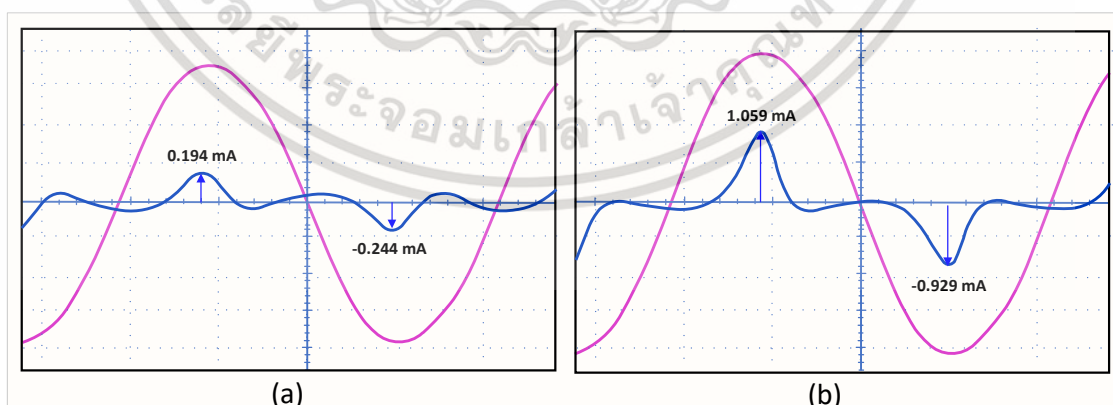
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลความต้านทานของตัวอย่างทดลองที่ 2.1 สำหรับแรงดันที่แรงดันที่ 1mA (a) และแรงดันที่ 24 kV (b) หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสพัลส์ซ้ำจำนวน 5 ครั้ง

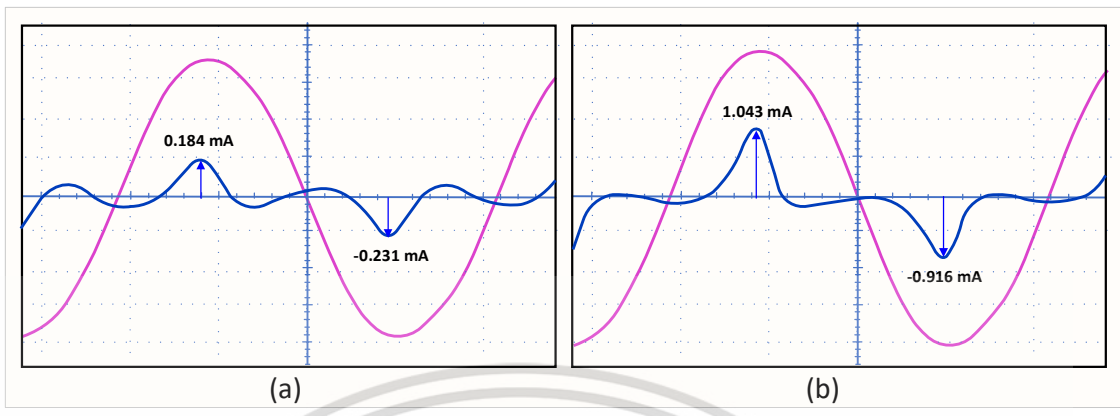


รูปที่ 4.14 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลความต้านทานของตัวอย่างทดลองที่ 2.2 สำหรับแรงดันที่แรงดันที่ 1mA (a) และแรงดันที่ 24 kV (b) หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสพัลส์ซ้ำจำนวน 5 ครั้ง



รูปที่ 4.15 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลความต้านทานของตัวอย่างทดลองที่ 2.3 สำหรับแรงดันที่แรงดันที่ 1mA (a) และแรงดันที่ 24 kV (b) หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสพัลส์ซ้ำจำนวน 5 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลความต้านทานของตัวอย่างทดลองที่ 2.4 สำหรับแรงดันที่แรงดันที่ 1mA (a) และแรงดันที่ 24 kV(b) หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสพัลส์ข้าวบวกรจำนวน 5 ครั้ง

จากนั้นตัวอย่างทดสอบที่ 2.1 และ 2.2 ถูกป้อนด้วยกระแสพัลส์ฟ้ามาตรฐาน **ข้าวลบ** จำนวน 5 ครั้ง ในขณะที่เดียวกันตัวอย่างทดสอบที่ 2.3 และ 2.4 ถูกป้อนด้วยกระแสพัลส์ฟ้ามาตรฐาน **ข้าวบวก** จำนวน 5 ครั้งเช่นกัน แต่ครั้งทั้งกันเป็นเวลา 60 s ขณะที่กับดักเสิร์จเกิดการดิสชาร์จพลังงาน รูปคลื่นแรงดันคงเหลือที่ตกคร่อมกับดักเสิร์จและกระแสดิสชาร์จจะถูกทำการวัดและบันทึกค่า ซึ่งถูกแสดงในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 รูปคลื่นแรงดันคงเหลือและกระแสดิสชาร์จที่ทำการบันทึกของตัวอย่างทดสอบที่ 2.1 ถึง 2.4 หลังจากได้รับกระแสพัลส์ต่อเนื่องจำนวน 5 ครั้ง (ครั้งที่ 3)

ตัวอย่างทดสอบ	ครั้งที่	รูปคลื่นแรงดันคงเหลือและกระแสดิสชาร์จ	รายละเอียด
ตัวอย่างทดสอบที่ 2.1	3		<b>Ch1: Voltage</b> Up = -67.450 kV <b>Ch2: Current</b> Ip = 10.016 kA T1 = 8.406 µs T2 = 18.06 µs TEnd = 22.12 µs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10(ต่อ) รูปคลื่นแรงดันคองเทิลและกระแสสวิตซ์ที่ทำการบันทึกของตัวอย่างทดสอบที่ 2.1 ถึง 2.4 หลังจากได้รับกระแสอิมพัลส์ต่อเนื่องจำนวน 5 ครั้ง (ครั้งที่ 3)

ตัวอย่างทดสอบ	ครั้งที่	รูปคลื่นแรงดันคองเทิลและกระแสสวิตซ์	รายละเอียด
ตัวอย่างทดสอบที่ 2.1	5		<b>Ch1: Voltage</b> $U_p = -67.614 \text{ kV}$ <b>Ch2: Current</b> $I_p = 10.088 \text{ kA}$ $T_1 = 8.338 \text{ }\mu\text{s}$ $T_2 = 17.91 \text{ }\mu\text{s}$ $T_{\text{End}} = 21.95 \text{ }\mu\text{s}$
ตัวอย่างทดสอบที่ 2.2	3		<b>Ch1: Voltage</b> $U_p = -67.214 \text{ kV}$ <b>Ch2: Current</b> $I_p = 10.221 \text{ kA}$ $T_1 = 8.403 \text{ }\mu\text{s}$ $T_2 = 18.04 \text{ }\mu\text{s}$ $T_{\text{End}} = 22.12 \text{ }\mu\text{s}$
ตัวอย่างทดสอบที่ 2.2	5		<b>Ch1: Voltage</b> $U_p = -66.907 \text{ kV}$ <b>Ch2: Current</b> $I_p = 10.049 \text{ kA}$ $T_1 = 8.414 \text{ }\mu\text{s}$ $T_2 = 18.10 \text{ }\mu\text{s}$ $T_{\text{End}} = 22.18 \text{ }\mu\text{s}$
ตัวอย่างทดสอบที่ 2.3	3		<b>Ch1: Voltage</b> $U_p = 70.297 \text{ kV}$ <b>Ch2: Current</b> $I_p = -10.021 \text{ kA}$ $T_1 = 8.405 \text{ }\mu\text{s}$ $T_2 = 18.12 \text{ }\mu\text{s}$ $T_{\text{End}} = 22.28 \text{ }\mu\text{s}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10(ต่อ) รูปคลื่นแรงดันคงเหลือและกระแสดีสชาร์จที่ทำการบันทึกของตัวอย่างทดสอบที่ 2.1 ถึง 2.4 หลังจากได้รับกระแสอิมพัลส์ต่อเนื่องจำนวน 5 ครั้ง (ครั้งที่ 3)

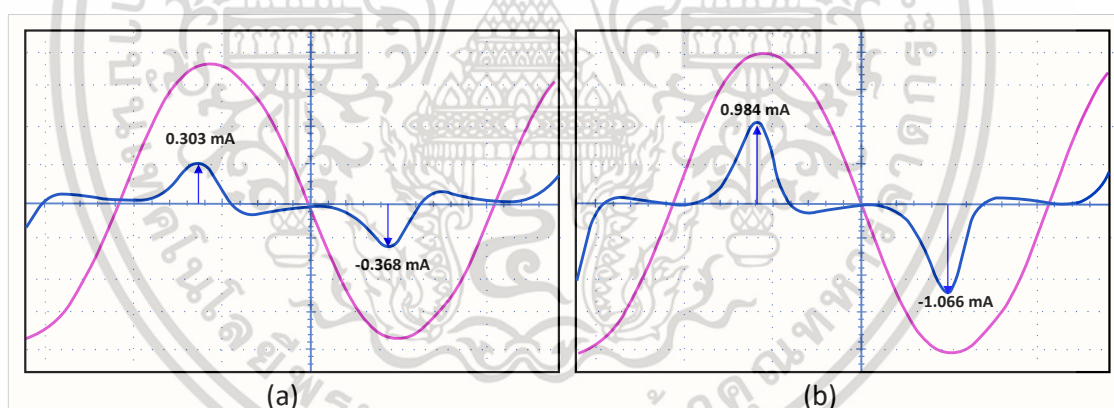
ตัวอย่างทดสอบ	ครั้งที่	รูปคลื่นแรงดันคงเหลือและกระแสดีสชาร์จ	รายละเอียด
ตัวอย่างทดสอบที่ 2.3	5		<b>Ch1: Voltage</b> $U_p = 71.997 \text{ kV}$ <b>Ch2: Current</b> $I_p = -9.8711 \text{ kA}$ $T_1 = 8.417 \text{ } \mu\text{s}$ $T_2 = 18.14 \text{ } \mu\text{s}$ $T_{\text{End}} = 22.34 \text{ } \mu\text{s}$
ตัวอย่างทดสอบที่ 2.4	3		<b>Ch1: Voltage</b> $U_p = 71.916 \text{ kV}$ <b>Ch2: Current</b> $I_p = -9.8488 \text{ kA}$ $T_1 = 8.412 \text{ } \mu\text{s}$ $T_2 = 18.15 \text{ } \mu\text{s}$ $T_{\text{End}} = 22.32 \text{ } \mu\text{s}$
ตัวอย่างทดสอบที่ 2.4	5		<b>Ch1: Voltage</b> $U_p = 70.256 \text{ kV}$ <b>Ch2: Current</b> $I_p = -10.027 \text{ kA}$ $T_1 = 8.423 \text{ } \mu\text{s}$ $T_2 = 18.11 \text{ } \mu\text{s}$ $T_{\text{End}} = 22.27 \text{ } \mu\text{s}$

เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการป้อนกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าต่อเนื่อง กระแสรั่วไหลความต้านทานที่แรงดัน 24 kV และแรงดันอ้างอิงที่ 1 mA ตลอดจนรูปคลื่นกระแสที่แสดงผลถูกบันทึกค่าเก็บไว้ ดังแสดงในตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.17 - รูปที่ 4.20

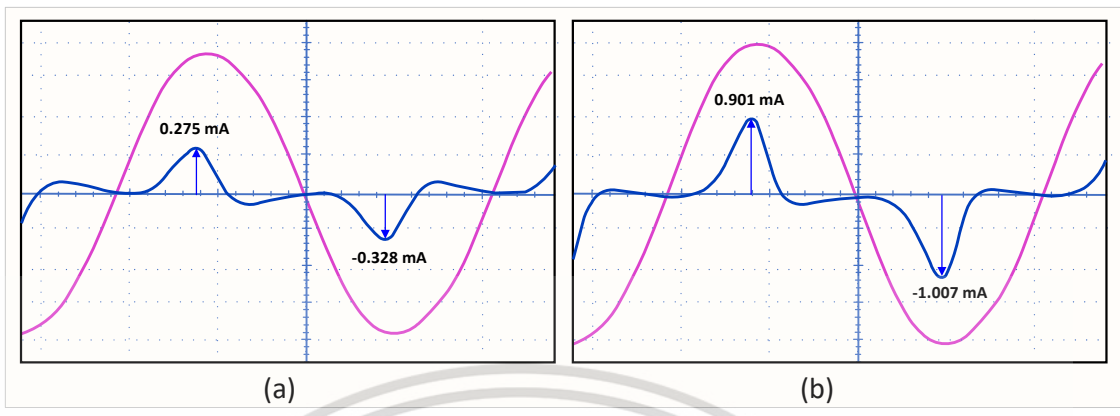
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ถูกทำการวัดของตัวอย่างทดสอบที่ 2.1 - 2.4 หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสอิมพัลส์ต่อเนื่องจำนวน 5 ครั้ง (ครั้งที่ 3)

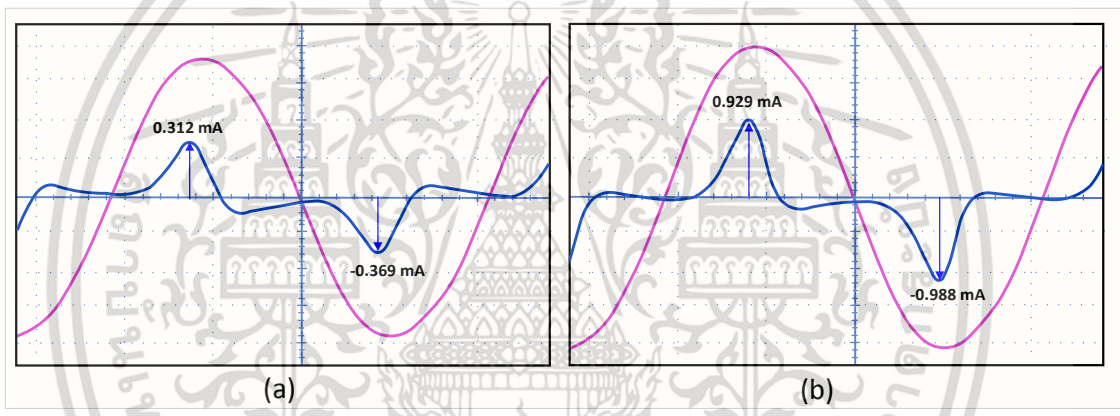
ตัวแปร	กลุ่มที่ 1		กลุ่มที่ 2	
	ตัวอย่าง 2.1	ตัวอย่าง 2.2	ตัวอย่าง 2.3	ตัวอย่าง 2.4
อุณหภูมิ (ส่วนบน, ส่วนกลาง, ส่วนล่าง) [°C]	55.6, 59.2, 46.3	56.1, 56.7, 47.4	55.1, 57.2, 47.3	54.2, 58.2, 48.5
ค่ายอดกระแสรั่วความต้านทานที่ 24 kV (ค่ายอดฝั่งบวก/ค่ายอดฝั่งลบ)	0.303, - 0.368 [mA]	0.275, - 0.328 [mA]	0.312, - 0.369 [mA]	0.243,- 0.288 [mA]
เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างค่ายอด +/-	17.66%	16.16%	15.45%	15.63%
ค่ายอดกระแสรั่วความต้านทานที่แรงดัน อ้างอิงกระแสรั่วที่ 1 mA (ค่ายอดฝั่งบวก/ค่ายอดฝั่งลบ)	0.984, - 1.066 [mA] [25.7kV]	0.901, - 1.007 [mA] [25.7 kV]	0.929, - 0.988 [mA] [25.9kV]	0.971, - 1.012 [mA] [26kV]
เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างค่ายอด +/-	7.69%	10.53%	5.97%	4.05%



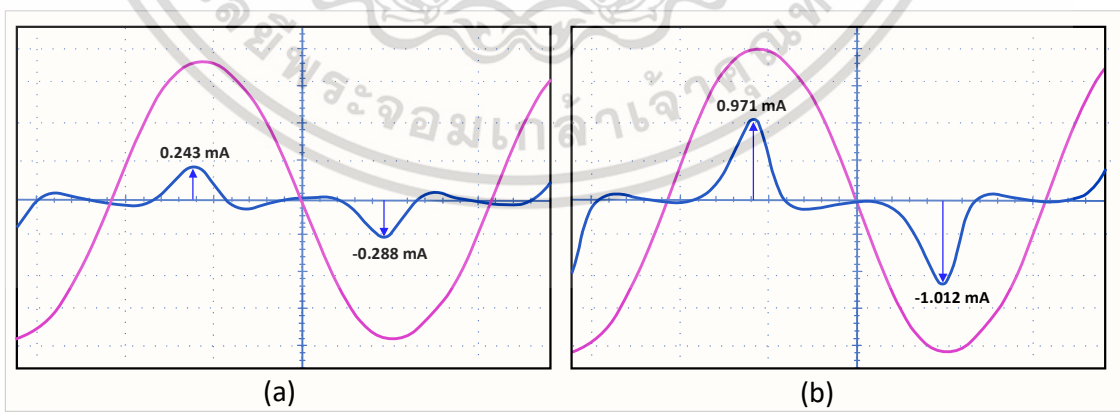
รูปที่ 4.17 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลความต้านทานของตัวอย่างทดลองที่ 2.1 สำหรับแรงดันที่แรงดันที่ 1mA (a) และแรงดันที่ 24 kV (b) หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสอิมพัลส์พัลส์จำนวน 5 ครั้ง



รูปที่ 4.18 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลความต้านทานของตัวอย่างทดลองที่ 2.2 สำหรับแรงดันที่แรงดันที่ 1mA (a) และแรงดันที่ 24 kV (b) หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสพัลส์ซ้ำจำนวน 5 ครั้ง



รูปที่ 4.19 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลความต้านทานของตัวอย่างทดลองที่ 2.3 สำหรับแรงดันที่แรงดันที่ 1mA (a) และแรงดันที่ 24 kV (b) หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสพัลส์ซ้ำจำนวน 5 ครั้ง



รูปที่ 4.20 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลความต้านทานของตัวอย่างทดลองที่ 2.4 สำหรับแรงดันที่แรงดันที่ 1mA (a) และแรงดันที่ 24 kV (b) หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสพัลส์ซ้ำจำนวน 5 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนต่อไปคือตัวอย่างทดสอบที่ 2.1 และ 2.2 ถูกป้อนด้วยกระแสिमพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นมาตรฐาน**ขั้วลบ** จำนวน 10 ครั้ง ในขณะเดียวกันตัวอย่างทดสอบที่ 2.3 และ 2.4 ถูกป้อนด้วยกระแสिमพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นมาตรฐาน**ขั้วบวก** จำนวน 10 ครั้งเช่นกัน โดยที่ทุก ๆ 5 ครั้งหลังจากกระบวนการป้อนกระแสिमพัลส์จะมีการวัดรูปคลื่นกระแสรั่วไหลความต้านทานเพื่อเก็บข้อมูล โดยที่

- รูปคลื่นแรงดันคงเหลือที่ตกคร่อมกับดักเสิร์จและกระแสिमพัลส์จะถูกรวบรวมและบันทึกค่าของการป้อนกระแสिमพัลส์ครั้งที่ 4 ถูกแสดงในตารางที่ 4.11
- กระแสรั่วไหลความต้านทานที่แรงดัน 24 kV และแรงดันอ้างอิงที่ 1 mA ตลอดจนรูปคลื่นกระแสที่แสดงผลครั้งที่ 5 ถูกแสดงในตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.21 - รูปที่ 4.24
- รูปคลื่นแรงดันคงเหลือที่ตกคร่อมกับดักเสิร์จและกระแสिमพัลส์จะถูกรวบรวมและบันทึกค่าของการป้อนกระแสिमพัลส์ครั้งที่ 5 ถูกแสดงในตารางที่ 4.13
- กระแสรั่วไหลความต้านทานที่แรงดัน 24 kV และแรงดันอ้างอิงที่ 1 mA ตลอดจนรูปคลื่นกระแสที่แสดงผลครั้งที่ 5 ถูกแสดงในตารางที่ 4.14 และ รูปที่ 4.25 - รูปที่ 4.28

หลังจากกระบวนการป้อนกระแสिमพัลส์ครั้งที่ 5 ก็จะเป็นการเสร็จสิ้นกระบวนการการทดลอง โดยจากการทดลองจะมีการป้อนกระแสिमพัลส์ทั้งหมดจำนวน 25 ครั้งให้กับกับดักเสิร์จแต่ละตัวเพื่อศึกษาพฤติกรรมของความไม่สมมาตรของกระแสรั่วไหลความต้านทาน

ตารางที่ 4.12 รูปคลื่นแรงดันคงเหลือและกระแสिमพัลส์ที่ทำการบันทึกของตัวอย่างทดสอบที่ 2.1 ถึง 2.4 หลังจากได้รับกระแสिमพัลส์ต่อเนื่องจำนวน 5 ครั้ง (ครั้งที่ 4)

ตัวอย่างทดสอบ	ครั้งที่	รูปคลื่นแรงดันคงเหลือและกระแสिमพัลส์	รายละเอียด
ตัวอย่างทดสอบที่ 2.1	3		<b>Ch1: Voltage</b> $U_p = -67.250 \text{ kV}$ <b>Ch2: Current</b> $I_p = 10.106 \text{ kA}$ $T_1 = 8.410 \text{ } \mu\text{s}$ $T_2 = 19.05 \text{ } \mu\text{s}$ $T_{\text{End}} = 22.22 \text{ } \mu\text{s}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12(ต่อ) รูปคลื่นแรงดันคองเหลือและกระแสสวิตซ์ที่ทำการบันทึกของตัวอย่างทดสอบที่ 2.1 ถึง 2.4 หลังจากได้รับกระแสิมพัลส์ต่อเนื่องจำนวน 5 ครั้ง (ครั้งที่ 4)

ตัวอย่างทดสอบ	ครั้งที่	รูปคลื่นแรงดันคองเหลือและกระแสสวิตซ์	รายละเอียด
ตัวอย่างทดสอบที่ 2.1	5		<b>Ch1: Voltage</b> $U_p = -67.614 \text{ kV}$ <b>Ch2: Current</b> $I_p = 10.068 \text{ kA}$ $T_1 = 8.358 \mu\text{s}$ $T_2 = 18.91 \mu\text{s}$ $T_{\text{End}} = 22.00 \mu\text{s}$
ตัวอย่างทดสอบที่ 2.2	3		<b>Ch1: Voltage</b> $U_p = -67.114 \text{ kV}$ <b>Ch2: Current</b> $I_p = 10.321 \text{ kA}$ $T_1 = 8.213 \mu\text{s}$ $T_2 = 18.14 \mu\text{s}$ $T_{\text{End}} = 22.14 \mu\text{s}$
ตัวอย่างทดสอบที่ 2.2	5		<b>Ch1: Voltage</b> $U_p = -66.997 \text{ kV}$ <b>Ch2: Current</b> $I_p = 10.129 \text{ kA}$ $T_1 = 8.411 \mu\text{s}$ $T_2 = 19.23 \mu\text{s}$ $T_{\text{End}} = 22.28 \mu\text{s}$
ตัวอย่างทดสอบที่ 2.3	3		<b>Ch1: Voltage</b> $U_p = 66.856 \text{ kV}$ <b>Ch2: Current</b> $I_p = -10.329 \text{ kA}$ $T_1 = 8.394 \mu\text{s}$ $T_2 = 19.05 \mu\text{s}$ $T_{\text{End}} = 22.10 \mu\text{s}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

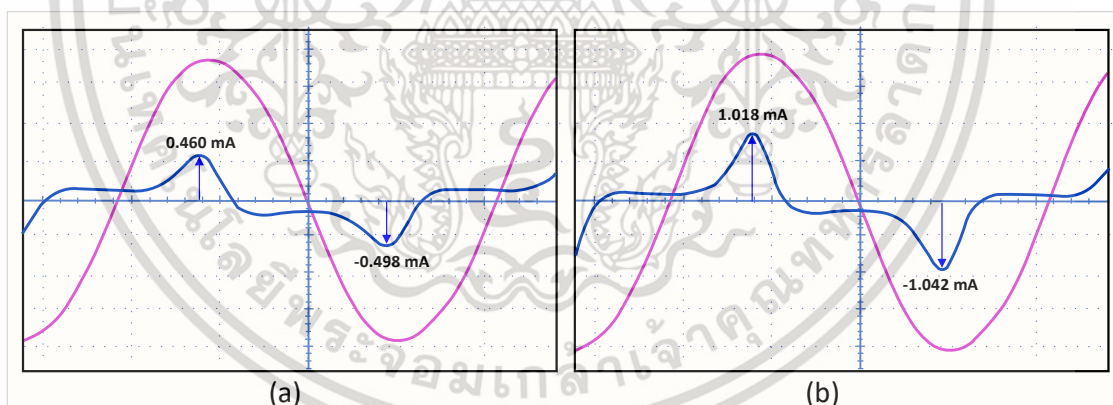
ตารางที่ 4.12(ต่อ) รูปคลื่นแรงดันคองเหลือและกระแสสวิตช์ที่ทำการบันทึกของตัวอย่างทดสอบที่ 2.1 ถึง 2.4 หลังจากได้รับกระแสสัมผัสต่อเนื่องจำนวน 5 ครั้ง (ครั้งที่ 4)

ตัวอย่างทดสอบ	ครั้งที่	รูปคลื่นแรงดันคองเหลือและกระแสสวิตช์	รายละเอียด
ตัวอย่างทดสอบที่ 2.3	5		<b>Ch1: Voltage</b> $U_p = 67.019 \text{ kV}$ <b>Ch2: Current</b> $I_p = -10.302 \text{ kA}$ $T_1 = 8.428 \text{ } \mu\text{s}$ $T_2 = 19.06 \text{ } \mu\text{s}$ $T_{\text{End}} = 22.12 \text{ } \mu\text{s}$
ตัวอย่างทดสอบที่ 2.4	3		<b>Ch1: Voltage</b> $U_p = 67.194 \text{ kV}$ <b>Ch2: Current</b> $I_p = -10.292 \text{ kA}$ $T_1 = 8.410 \text{ } \mu\text{s}$ $T_2 = 19.06 \text{ } \mu\text{s}$ $T_{\text{End}} = 22.10 \text{ } \mu\text{s}$
ตัวอย่างทดสอบที่ 2.4	5		<b>Ch1: Voltage</b> $U_p = 67.275 \text{ kV}$ <b>Ch2: Current</b> $I_p = -10.301 \text{ kA}$ $T_1 = 8.407 \text{ } \mu\text{s}$ $T_2 = 19.05 \text{ } \mu\text{s}$ $T_{\text{End}} = 22.09 \text{ } \mu\text{s}$

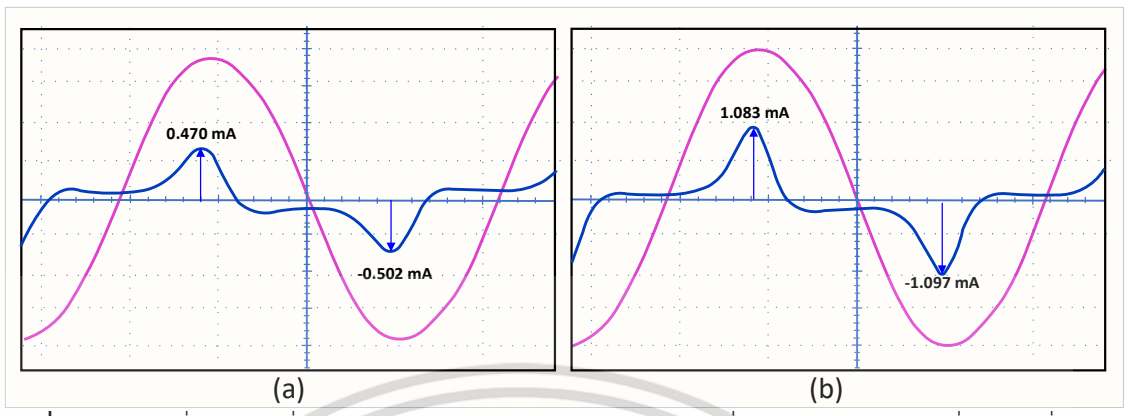
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ถูกทำการวัดของตัวอย่างทดสอบที่ 2.1 - 2.4 หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสอิมพัลส์ต่อเนื่องจำนวน 5 ครั้ง (ครั้งที่ 4)

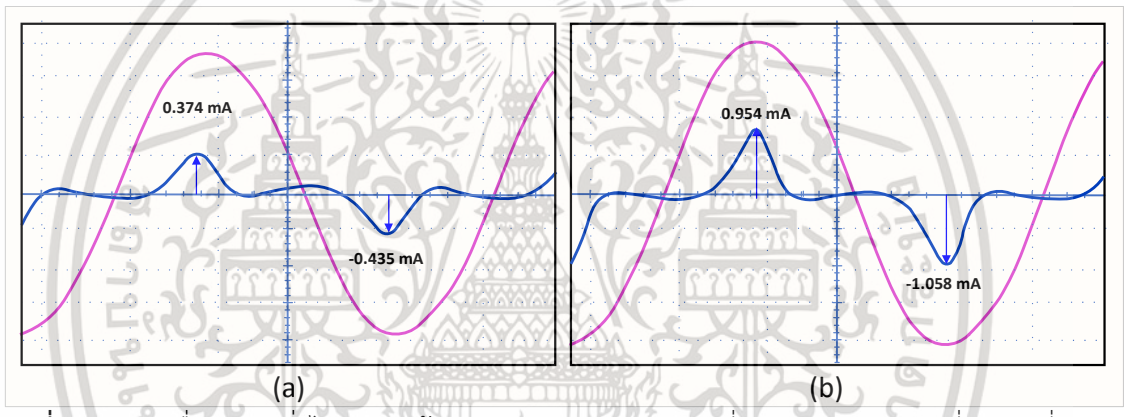
ตัวแปร	กลุ่มที่ 1		กลุ่มที่ 2	
	ตัวอย่าง 2.1	ตัวอย่าง 2.2	ตัวอย่าง 2.3	ตัวอย่าง 2.4
อุณหภูมิ (ส่วนบน, ส่วนกลาง, ส่วนล่าง) [°C]	53.2, 60.2, 46.1	52.1, 56.5, 48.4	56.1, 59.1, 47.1	52.8, 59.1, 48.5
ค่ายอดกระแสรั่วความต้านทานที่ 24 kV (ค่ายอดฝั่งบวก/ค่ายอดฝั่งลบ)	0.460, - 0.498 [mA]	0.470, - 0.502 [mA]	0.374, - 0.435 [mA]	0.381, - 0.425 [mA]
เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างค่ายอด +/-	7.63%	6.37%	14.02%	10.35%
ค่ายอดกระแสรั่วความต้านทานที่แรงดัน อ้างอิงกระแสรั่วที่ 1 mA (ค่ายอดฝั่งบวก/ค่ายอดฝั่งลบ)	1.018, - 1.042 [mA] [25.7kV]	1.083, - 1.097 [mA] [25.7 kV]	0.954, - 1.058 [mA] [25.9kV]	0.959, - 1.025 [mA] [26kV]
เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างค่ายอด +/-	2.30%	1.28%	9.83%	6.44%



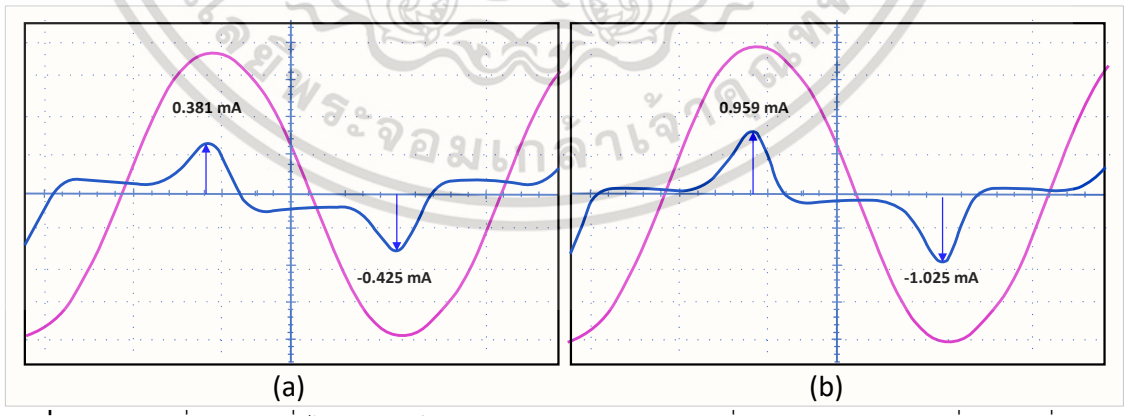
รูปที่ 4.21 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลความต้านทานของตัวอย่างทดสอบที่ 2.1 สำหรับแรงดันที่แรงดันที่ 1mA (a) และแรงดันที่ 24 kV (b) หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสอิมพัลส์ชั่วพลจำนวน 5 ครั้ง



รูปที่ 4.22 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลความต้านทานของตัวอย่างทดลองที่ 2.2 สำหรับแรงดันที่แรงดันที่ 1mA (a) และแรงดันที่ 24 kV (b) หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสพัลส์ชั่วพลจำนวน 5 ครั้ง



รูปที่ 4.23 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลความต้านทานของตัวอย่างทดลองที่ 2.3 สำหรับแรงดันที่แรงดันที่ 1mA (a) และแรงดันที่ 24 kV (b) หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสพัลส์ชั่วพลจำนวน 5 ครั้ง



รูปที่ 4.24 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลความต้านทานของตัวอย่างทดลองที่ 2.4 สำหรับแรงดันที่แรงดันที่ 1mA (a) และแรงดันที่ 24 kV (b) หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสพัลส์ชั่วพลจำนวน 5 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.14 รูปคลื่นแรงดันคงเหลือและกระแสสชาร์จที่ทำการบันทึกของตัวอย่างทดสอบที่ 2.1 ถึง 2.4 หลังจากได้รับกระแสอิมพัลส์ต่อเนื่องจำนวน 5 ครั้ง (ครั้งที่ 5)

ตัวอย่างทดสอบ	ครั้งที่	รูปคลื่นแรงดันคงเหลือและกระแสสชาร์จ	รายละเอียด
ตัวอย่างทดสอบที่ 2.1	3		<b>Ch1: Voltage</b> Up = -67.443 kV <b>Ch2: Current</b> Ip = 10.114 kA T1 = 8.350 μs T2 = 18.95 μs TEnd = 22.31 μs
ตัวอย่างทดสอบที่ 2.1	5		<b>Ch1: Voltage</b> Up = -67.614 kV <b>Ch2: Current</b> Ip = 10.056 kA T1 = 8.258 μs T2 = 19.51 μs TEnd = 22.10 μs
ตัวอย่างทดสอบที่ 2.2	3		<b>Ch1: Voltage</b> Up = -67.214 kV <b>Ch2: Current</b> Ip = 10.121 kA T1 = 8.112 μs T2 = 19.24 μs TEnd = 23.12 μs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13(ต่อ) รูปคลื่นแรงดันคองเหลือและกระแสสวิตซ์ที่ทำการบันทึกของตัวอย่างทดสอบที่ 2.1 ถึง 2.4 หลังจากได้รับกระแสอิมพัลส์ต่อเนื่องจำนวน 5 ครั้ง (ครั้งที่ 5)

ตัวอย่างทดสอบ	ครั้งที่	รูปคลื่นแรงดันคองเหลือและกระแสสวิตซ์	รายละเอียด
ตัวอย่างทดสอบที่ 2.2	5		<b>Ch1: Voltage</b> $U_p = -66.987 \text{ kV}$ <b>Ch2: Current</b> $I_p = 10.229 \text{ kA}$ $T_1 = 8.401 \mu\text{s}$ $T_2 = 18.73 \mu\text{s}$ $T_{\text{End}} = 22.28 \mu\text{s}$
ตัวอย่างทดสอบที่ 2.3	3		<b>Ch1: Voltage</b> $U_p = 67.101 \text{ kV}$ <b>Ch2: Current</b> $I_p = -10.307 \text{ kA}$ $T_1 = 8.403 \mu\text{s}$ $T_2 = 18.06 \mu\text{s}$ $T_{\text{End}} = 22.12 \mu\text{s}$
ตัวอย่างทดสอบที่ 2.3	5		<b>Ch1: Voltage</b> $U_p = 67.316 \text{ kV}$ <b>Ch2: Current</b> $I_p = -10.287 \text{ kA}$ $T_1 = 8.407 \mu\text{s}$ $T_2 = 18.03 \mu\text{s}$ $T_{\text{End}} = 22.10 \mu\text{s}$
ตัวอย่างทดสอบที่ 2.4	3		<b>Ch1: Voltage</b> $U_p = 67.357 \text{ kV}$ <b>Ch2: Current</b> $I_p = -10.273 \text{ kA}$ $T_1 = 8.416 \mu\text{s}$ $T_2 = 18.06 \mu\text{s}$ $T_{\text{End}} = 22.08 \mu\text{s}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

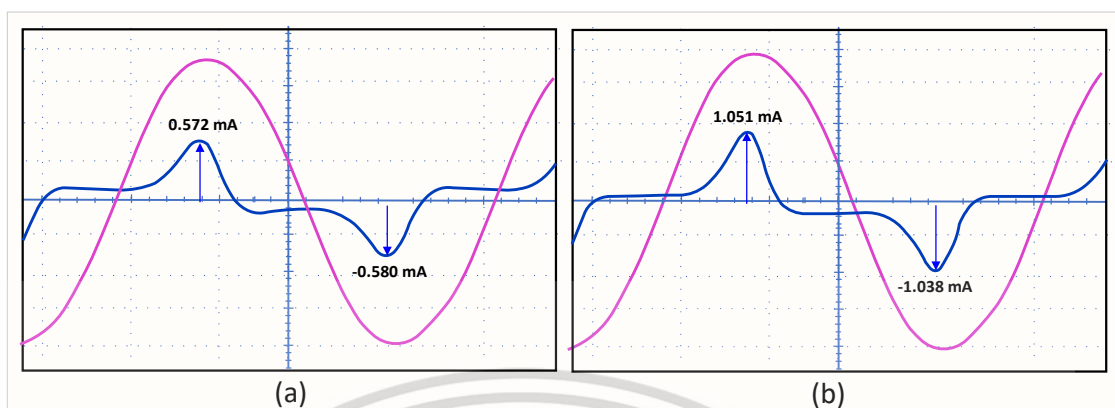
ตารางที่ 4.13(ต่อ) รูปคลื่นแรงดันคงเหลือและกระแสชาร์จที่ทำการบันทึกของตัวอย่างทดสอบที่ 2.1 ถึง 2.4 หลังจากได้รับกระแสิมพัลส์ต่อเนื่องจำนวน 5 ครั้ง (ครั้งที่ 5)

ตัวอย่างทดสอบ	ครั้งที่	รูปคลื่นแรงดันคงเหลือและกระแสชาร์จ	รายละเอียด
ตัวอย่างทดสอบที่ 2.4	5		<b>Ch1: Voltage</b> $U_p = 67.521 \text{ kV}$ <b>Ch2: Current</b> $I_p = -10.273 \text{ kA}$ $T_1 = 8.415 \mu\text{s}$ $T_2 = 18.05 \mu\text{s}$ $T_{\text{End}} = 22.10 \mu\text{s}$

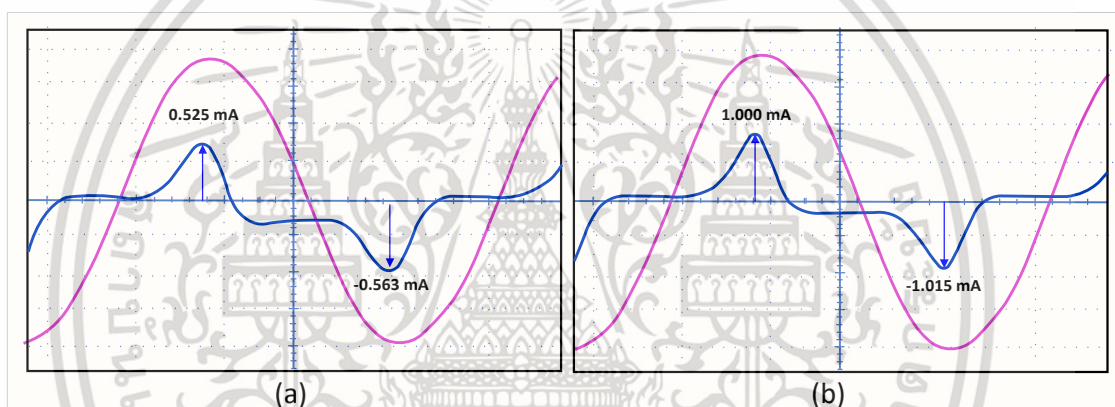
ตารางที่ 4.15 ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ถูกทำการวัดของตัวอย่างทดสอบที่ 2.1 - 2.4 หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสิมพัลส์ต่อเนื่องจำนวน 5 ครั้ง (ครั้งที่ 5)

ตัวแปร	กลุ่มที่ 1		กลุ่มที่ 2	
	ตัวอย่าง 2.1	ตัวอย่าง 2.2	ตัวอย่าง 2.3	ตัวอย่าง 2.4
อุณหภูมิ (ส่วนบน, ส่วนกลาง, ส่วนล่าง) [°C]	68.5, 68.0, 52.6	60.1, 63.3, 55.6	52.0, 54.6, 46.5	62.0, 62.3, 54
ค่ายอดกระแสรั่วความต้านทานที่ 24 kV (ค่ายอดฝั่งบวก/ค่ายอดฝั่งลบ)	0.572, - 0.580 [mA]	0.525, - 0.563 [mA]	0.483, - 0.551 [mA]	0.447, 0.525 [mA]
เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างค่ายอด +/-	1.38%	6.75%	12.34%	14.86%
ค่ายอดกระแสรั่วความต้านทานที่แรงดัน อ้างอิงกระแสรั่วที่ 1 mA (ค่ายอดฝั่งบวก/ค่ายอดฝั่งลบ)	1.051, - 1.038 [mA] [25.7kV]	1.00, - 1.015 [mA] [25.7 kV]	0.906, - 1.00 [mA] [25.9kV]	0.938, - 1.039 [mA] [26kV]
เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างค่ายอด +/-	-1.25%	1.48%	9.40%	9.72%

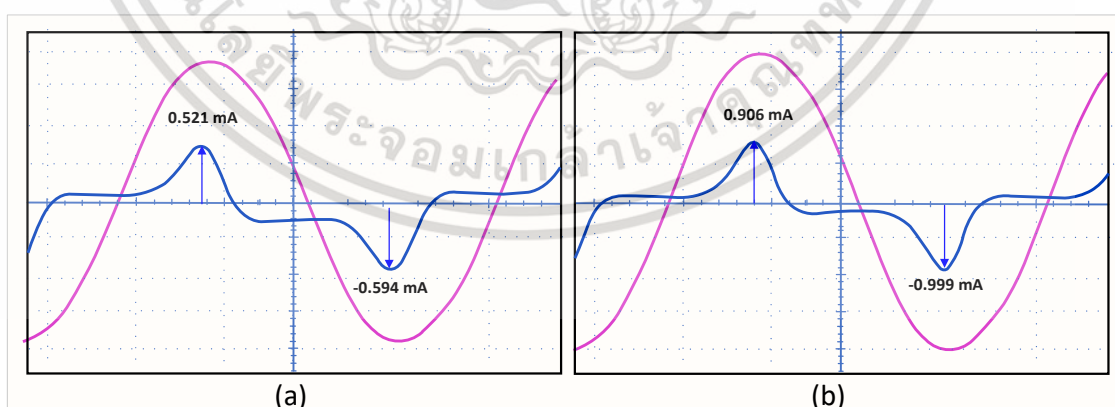
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลความต้านทานของตัวอย่างทดลองที่ 2.1 สำหรับแรงดันที่แรงดันที่ 1mA (a) และแรงดันที่ 24 kV (b) หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสพัลส์ชั่วเวลาจำนวน 5 ครั้ง

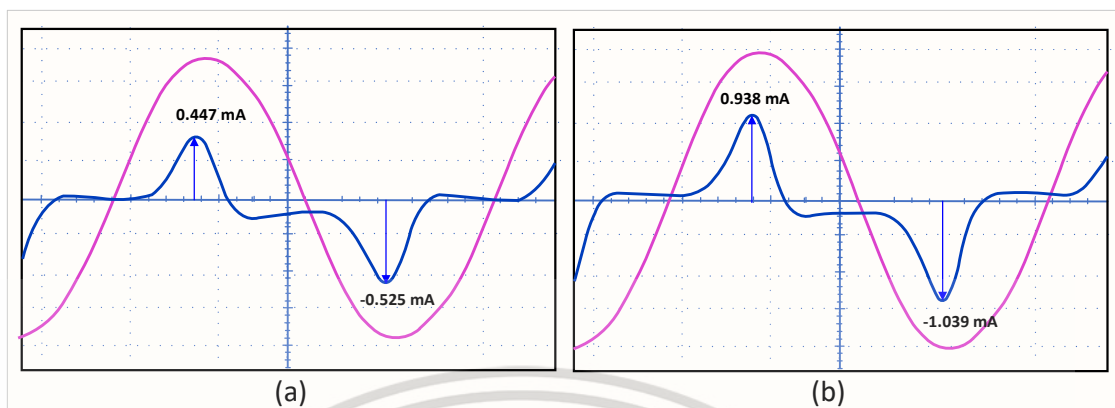


รูปที่ 4.26 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลความต้านทานของตัวอย่างทดลองที่ 2.2 สำหรับแรงดันที่แรงดันที่ 1mA (a) และแรงดันที่ 24 kV (b) หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสพัลส์ชั่วเวลาจำนวน 5 ครั้ง



รูปที่ 4.27 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลความต้านทานของตัวอย่างทดลองที่ 2.3 สำหรับแรงดันที่แรงดันที่ 1mA (a) และแรงดันที่ 24 kV (b) หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสพัลส์ชั่วเวลาจำนวน 5 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลความต้านทานของตัวอย่างทดลองที่ 2.4 สำหรับแรงดันที่แรงดันที่ 1mA (a) และแรงดันที่ 24 kV (b) หลังจากถูกป้อนด้วยกระแสพัลส์ซ้ำววกจำนวน 5 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองที่ 1 เป็นการป้อนกระแสอิมพัลส์ต่อเนื่องให้กับตัวอย่างทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมกระแสรั่วไหลที่ไม่สมมาตร ซึ่งพฤติกรรมความไม่สมมาตรดังกล่าวนั้นถูกพิจารณาด้วยผลต่างระหว่างค่ายอดกระแสรั่วไหลความต้านทานฝั่งบวกและฝั่งลบ ระยะเวลาระหว่างอิมพัลส์ที่ป้อนแต่ละครั้งของการทดลองนี้นั้นห่างกัน 30 วินาที ก่อนหน้ากระบวนการป้อนกระแสอิมพัลส์นั้น รูปคลื่นกระแสรั่วไหลตอนแรกเริ่มถูกทำการวัดและบันทึกไว้ รูปคลื่นกระแสตอนแรกเริ่มนั้นมีความไม่สมมาตรอยู่ที่ 10-13% ณ แรงดันพิกัด และความไม่สมมาตรที่ 1% เมื่อทำการวัดที่แรงดันอ้างอิงกระแส 1mA โดยขั้นตอนแรกได้ทำการป้อนกระแสอิมพัลส์ต่อเนื่องชั่วคราว พบว่ารูปคลื่นกระแสรั่วไหลที่วัดได้นั้นมีความไม่สมมาตรเพิ่มขึ้นเป็น 71-73% ณ แรงดันพิกัด และ 57-60% ที่แรงดันอ้างอิงกระแส 1mA โดยความไม่สมมาตรนั้นเพิ่มขึ้นมาอย่างเห็นได้ชัด เมื่อรูปคลื่นกระแสรั่วไหลถูกพิจารณานั้นพบว่าความไม่สมมาตรที่เกิดขึ้น จะมีค่ายอดของกระแสฝั่งลบมากกว่าฝั่งบวกมาก ๆ และแม้ว่าตัวอย่างทดสอบนั้นถูกทิ้งไว้เพื่อให้เย็นตัวลงตามธรรมชาติเป็นเวลา 1 วันแล้วก็ตามแต่ความไม่สมมาตรนั้นลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (ยังคงอยู่ที่ประมาณ 70% ณ แรงดันพิกัด) โดยจากการตีความเบื้องต้นแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิเย็นตัวลงหลังจากกับดักเสิร์จได้ทำการดิซาร์จพลังงานนั้นไม่มีผลทำให้ความไม่สมมาตรนั้นหายไป

และเมื่อทำการป้อนกระแสอิมพัลส์แบบต่อเนื่องชั่วคราวให้กับตัวอย่างทดสอบเดิม โดยในระหว่างกระบวนการป้อนกระแสอิมพัลส์แบบต่อเนื่อง กับดักเสิร์จตัวอย่างทดสอบที่ 1 ได้เกิดชำรุดเสียหายก่อนที่จะเสิร์จสิ้นกระบวนการป้อนกระแสอิมพัลส์แบบต่อเนื่องครั้งที่ 2 ในขณะที่กับดักเสิร์จอีกตัวสามารถทนได้จนเสิร์จสิ้นกระบวนการ ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ว่าพฤติกรรมความไม่สมมาตรของกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นมีผลการคงทนต่อการเบรคดาวน์ของกับดักเสิร์จ แม้ว่าตัวอย่างอย่างทดสอบที่ 1 จะเกิดการเสียหายไป แต่รูปคลื่นกระแสรั่วไหลความต้านทานนั้นยังคงถูกวัดเพื่อยืนยันผล พบว่าความไม่สมมาตรนั้นลดลงเหลือประมาณ 2-3% เท่านั้นทั้งกระแสรั่วที่แรงดันพิกัดและที่แรงดันกระแสอ้างอิง 1mA จากกระบวนการที่ 2 นี้ทำให้ทราบว่ากระบวนการป้อนกระแสอิมพัลส์แบบต่อเนื่องชั่วคราวให้กับตัวอย่างทดสอบทั้งสองหลังจากที่มีการป้อนกระแสอิมพัลส์แบบต่อเนื่องชั่วคราวไป สามารถกำจัดพฤติกรรมความไม่สมมาตรของกระแสรั่วไหลได้ โดยจากการทดลองนั้นสามารถวิเคราะห์ได้ว่าพฤติกรรมความไม่สมมาตรที่เกิดขึ้นนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาจจะเกิดจากผลของประจุค้าง (Space charge) ที่อยู่ภายในกับดักเสิร์จหรืออยู่ระหว่างชั้นของตัวต้านทานวาริสเตอร์ เพื่อยืนยันสมมุติฐานดังกล่าว การทดลองที่ 2 ถูกทำขึ้น

ในการทดลองที่ 2 นี้ จะเป็นการศึกษาผลของขั้วของกระแสอิมพัลส์แบบต่อเนื่องต่อพฤติกรรมความไม่สมมาตรของกระแสรั่วไหล ในการทดลองที่ 2 นี้ตัวอย่างทดสอบถูกใช้ทั้งหมด 4 ตัวอย่าง โดยแบ่งเป็นกลุ่ม กลุ่มละ 2 ตัวอย่างเพื่อสร้างตัวแปรที่ต่างกันของการทดลองและเปรียบเทียบผล ในทำนองเดียวกันก่อนหน้าการทดลองรูปคลื่นกระแสรั่วไหลของตัวอย่างทดสอบจะถูกทำการวัดและบันทึกค่าขึ้น ซึ่งความไม่สมมาตรของกระแสรั่วไหลตอนเริ่มต้นนั้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 11-12% ณ แรงดันพิกัด และ 8-10% ที่แรงดันอ้างอิงกระแส 1mA ในขั้นตอนแรกจะเป็นการป้อนกระแสอิมพัลส์แบบต่อเนื่องจำนวน 5 ครั้งให้กับตัวอย่างทดสอบแต่ละกลุ่ม โดยระยะเวลาของแต่ละครั้งของการป้อนกระแสอิมพัลส์นั้นห่างกัน 1 นาที โดยกลุ่มที่ 1 นั้นถูกป้อนด้วยกระแสอิมพัลส์ขั้วบวก และกลุ่มที่ 2 ถูกป้อนด้วยขั้วลบ ผลปรากฏในทำนองเดียวกับการทดลองที่ 1 นั่นคือกลุ่มที่ถูกป้อนด้วยกระแสอิมพัลส์ขั้วบวกนั้นเกิดพฤติกรรมของความไม่สมมาตรขึ้น (เปอร์เซ็นต์ความไม่สมมาตรที่ 16%) ในกลุ่มที่ 2 ที่ได้รับอิทธิพลของกระแสขั้วลบ นั้น ความไม่สมมาตรลดลงเหลือประมาณ 5% และยิ่งไปกว่านั้นคือค่ายอดของกระแสรั่วไหลที่วัดได้ทางฝั่งบวกมีค่ามากกว่าฝั่งลบ แตกต่างจากพฤติกรรมของกลุ่มที่ 1 โดยสิ้นเชิง ต่อจากนั้นการทดลองถูกดำเนินด้วยการป้อนกระแสอิมพัลส์ต่อเนื่องขั้วเดิมต่อไปอีก 5 ครั้ง พบว่าความไม่สมมาตรที่เกิดขึ้นนั้นเพิ่มขึ้นทั้งกรณีของกลุ่มที่ 1 และ กลุ่มที่ 2

ต่อมาได้ทำการป้อนกระแสอิมพัลส์ขั้วตรงข้ามให้กับตัวอย่างทดสอบทั้ง 4 ตัว ผลปรากฏว่าในกลุ่มที่ 1 ที่ได้รับกระแสอิมพัลส์ขั้วลบนั้นความไม่สมมาตรลดลงจากเดิม (จาก 23% เหลือ 17%) และกลุ่มที่ 2 ที่ได้รับกระแสอิมพัลส์ขั้วบวกนั้น ความไม่สมมาตรของกระแสเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ(จาก 2% เพิ่มขึ้น 15%) อีกทั้งรูปคลื่นของกระแสที่จากเดิมนั้นค่ายอดฝั่งบวกมีค่าสูงกว่าฝั่งลบกลายเป็นฝั่งลบมากกว่าฝั่งบวก หลังจากนั้นตัวอย่างทดสอบทั้ง 4 ตัวอย่างได้ถูกป้อนกระแสอิมพัลส์ขั้วเดิมซ้ำอีก 2 รอบ รอบละ 5 ครั้งเช่นเดิม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าในกลุ่มที่ 1 นั้นความไม่สมมาตรยังคงลดลงเรื่อย ๆ ทุกครั้งที่ทำการป้อนกระแสอิมพัลส์แบบต่อเนื่องขั้วลบ และในทำนองเดียวกันกลุ่มที่ 2 เอง ความสมมาตรก็ยังคงเพิ่มขึ้นทุกครั้งเช่นกัน

ผลการทดลองที่ 2 นี้ชี้ให้เห็นถึงประเด็นที่พบหลายประเด็นด้วยกัน ประเด็นแรกคือขั้วของกระแสอิมพัลส์ที่ถูกป้อนให้กับตัวอย่างทดสอบนั้นมีผลต่อความไม่สมมาตรของรูปคลื่นกระแสรั่วไหล กล่าวคือหากกับดักเสิร์จถูกป้อนด้วยกระแสอิมพัลส์แบบต่อเนื่องขั้วบวก ความไม่สมมาตรที่เกิดขึ้นจะมีค่า

ยอดของกระแสฝึงบวมมากกว่าฝึงบวก และในทางตรงข้ามกับดักเสิร์จถูกป้องกันด้วยกระแสฝึบแบบต่อเนื่องชั่วลบจะให้ค่ายอดของกระแสฝึงบวมมากกว่าฝึงบลบ ประเด็นที่สองคือการป้องกันกระแสฝึบตรงข้ามให้กับกับดักเสิร์จจะสามารถหักล้างผลของความไม่สมมาตรที่เกิดขึ้นได้ ประการที่สามคือ ผลของชั่วมีอิทธิพลต่อการเพิ่มขึ้นของความไม่สมมาตรที่เกิดขึ้น หรืออีกนัยหนึ่งคืออิทธิพลของกระแสฝึบชั่วบวมทำให้พฤติกรรมความไม่สมมาตรมีการเพิ่มขึ้นมากกว่ากระแสฝึบชั่วลบอย่างเห็นได้ชัด ประการต่อมา นั่นคือการยืนยันผลของประจุก้างที่เกิดขึ้น โดยเมื่อป้องกันกระแสฝึบตรงข้ามประจุก้างที่เกิดขึ้นจะถูกหักล้างซึ่งกันและกัน ทำให้ความไม่สมมาตรที่เกิดขึ้นนั้นลดลงหรือหายไป และประการสุดท้ายคือตัวแปรด้านเวลาระหว่างการป้องกันกระแสฝึบแบบต่อเนื่องในแต่ละครั้งมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมความไม่สมมาตรที่เกิดขึ้นเช่นกัน กล่าวคือในการทดลองที่ 1 ระยะเวลาระหว่างการป้องกันกระแสฝึบระหว่างพัลส์แรกและพัลส์ถัดมาถูกกำหนดไว้ที่ 30 วินาที ในขณะที่การทดลองที่ 2 ถูกกำหนดไว้ที่ 1 นาที พบว่าหากระยะเวลาห่างพัลส์ที่ป้องกันนั้นสั้นลง ความไม่สมมาตรที่เกิดขึ้นจะมีค่ามากกว่า

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองทั้ง 2 การทดลองที่ผ่านมา นั้น ตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการทดลองที่ 1 และ 2 เป็นคนละยี่ห้อกัน โดยทั้งสองกลุ่มนี้นั้นเป็นยี่ห้อที่มีจำหน่ายและผลิตในประเทศ ซึ่งพฤติกรรมของความไม่สมมาตรที่ได้มีค่าที่ต่างกัน ดังนั้นตัวอย่างทดสอบของยี่ห้ออื่นอาจจะถูกนำมาทดลองแบบเดียวกันเพื่อตรวจสอบสมมุติฐานของการทดลองที่ถูกต้องยิ่งขึ้น

การทดลองที่อยู่ในงานวิจัยฉบับนี้เป็นการทดลองโดยการป้องกันกระแสฝึบแบบต่อเนื่องที่ระยะเวลาห่างพัลส์ต่างกัน ดังนั้นตัวแปรเวลาจึงเป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่ส่งผลต่อความไม่สมมาตรที่เกิดขึ้น

จากการทดสอบนั้น การวิเคราะห์การเพิ่มขึ้นของค่ายอดกระแสรั่วไหลความต้านทานของกับดักเสิร์จในแง่ของการเสื่อมสภาพนั้นพบว่าในการทดลองที่ 2 ค่ายอดของกระแสในช่วงกระบวนการป้องกันกระแสฝึบแบบต่อเนื่องยังคงเพิ่มขึ้นและลดลงสลับกันไปมา โดยพฤติกรรมนี้อาจจะบ่งบอกถึงการเสื่อมสภาพที่น้อยในระยะเริ่มแรก แต่ในกระบวนการป้องกันกระแสฝึบแบบต่อเนื่องช่วงหลัง พบว่าค่ายอดของกระแสเป็นไปในทิศทางเพิ่มขึ้น นั่นแสดงให้เห็นชัดว่ากับดักเสิร์จมีการเสื่อมสภาพเรียบร้อยแล้ว โดยงานวิจัยเชิงต่อยอดนั้นควรที่จะทำกระบวนการป้องกันกระแสฝึบต่อไปเรื่อย ๆ หลังจากกับดักเสิร์จมีการเสื่อมสภาพเรียบร้อยแล้วเพื่อศึกษาพฤติกรรมของกระแสรั่วไหลที่ไม่สมมาตรของกับดักเสิร์จที่เสื่อมสภาพแล้ว

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Rao, X. Guo, J. Zhou, Y. Wei, Q. and Liu, X. "Research on leakage current characteristic of metal oxide varistor" **1st International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE)**, 2017. pp. 680-685.
- [2] Khodsuz, M. and M. Mirzaie. "Condition Assessment of Metal Oxide Surge Arrester Based on Multi-Layer SVM Classifier" **Iranian journal of electrical and electronic engineering**. 2015, Vol 11. pp. 354-362.
- [3] Lee, B. H. Kang, S. M. Eom, J.-H. and Kawamura T. "A Monitoring Device of Leakage Currents Flowing through ZnO Surge Arresters" **Japanese Journal of Applied Physics**. 2003, Volume 42. April 2003. pp. 1568-1574.
- [4] Wanderley Neto, E. T. Costa, E. G. da Ferreira, T. V. and Maia, M. J. A. "Failure Analysis in ZnO Arresters Using Thermal Images" **2006 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition**, 2006. pp. 1-5.
- [5] He, J. Lin, J. Liu, W. Wang, H. Liao, Y. and Li, S. "Structure-Dominated Failure of Surge Arresters by Successive Impulses" **IEEE Transactions on Power Delivery**. 2017. Vol. 32, no. 4. pp. 1907-1914.
- [6] Amorim, H. P. Carvalho, A. T. D. Rodrigues, T. B. Borges, J. B. S. and Cunha, C. F. F. de C. "Experience with on-line insulation diagnostics of surge arresters by PD measurement in the field" **2016 IEEE International Conference on Dielectrics (ICD)**, 2016. pp. 472-475.
- [7] Lixiong, S. Kun, Q. Daming, C. Jiayu, T. and Lin, D. "A New model of Metal Oxide Arresters and the Recognition of Model Parameters" **2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)**, 2018. pp. 1-4.
- [8] Han, Y. Li, Z. and Zheng, H. "A new method to extract the resistive current of MOA based on least square" **2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)**, 2015. pp. 312-315.
- [9] Khodsuz M. and Mirzaie, M. "An improved time-delay addition method for MOSA resistive leakage current extraction under applied harmonic voltage" **Measurement**. 2016, Vol 77. pp. 327-334.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] Ghosh, R. Chatterjee, B. and Chakravorti, S. “A Novel Leakage Current Index for the Field Monitoring of Overhead Insulators Under Harmonic Voltage” **IEEE Transactions on Industrial Electronics**. 2018. Vol. 65, no. 2. pp. 1568-1576.
- [11] Lee, B. H. Kang, S. M. “Properties of ZnO varistor blocks under multiple lightning impulse voltages” **Current Applied Physics**, 2006, Vol 6. September 2006, pp. 844-851.
- [12] Haryono, T. Sirait, K. T. Tumiran, T. and Berahim, H. “The Damage of ZnO Arrester Block Due To Multiple Impulse Currents” **TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)**, 2011, Vol 9. April 2011, pp. 171-182.
- [13] CIGRE. 2013. **Cigre 549: Lightning Parameters for Engineering Applications**. Technical brochures.
- [14] Warner T. A. September 2011. **Lightning recorded at 7,207 images per second**. [Recorded video]. Rapid City, SD, USA: ZT Research.
- [15] สำรวย สังข์สะอาด. 2528. **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**. ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [16] James Dillon Cobine. 1958. **Gaseous Conductors Theory and Engineering Applications**. Dover Publications.
- [17] BERGER, K. 1997. **Lightning**. Academic Press.
- [18] SHINDO, M. HONMA, T. N. and MIYAKE, Y. “**Lightning location systems in Japan**” International conference on Lightning protection. 2000. pp. 161-165
- [19] RAKOV, V.A. “**A review of positive and bipolar lightning discharges**” American Meteorological Society. June 2003, pp. 767-776
- [20] สำรวย สังข์สะอาด. 2544. “**โครงการ การศึกษาและวิจัยปรากฏการณ์ฟ้าผ่าในประเทศไทย.**” รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ สกว.
- [21] Woodworth, J. 2011. “Arrester Reference Voltage.” **Arrester Facts**. 27 : 1-7.
- [22] KAUFMANN, R. H. and HALBERG, M. N. 1955. **Industrial power system handbook**. London : McGraw-Hill Book Co.
- [23] Andreas Küchler. 2018. **High Voltage Engineering Fundamentals Technology Applications**. Germany : Springer Vieweg.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [24] SCUD. "Isolation spark gap ISG10/ISG10S" **Lightning and surge protection**. n.p. 133.
- [25] Adria Jones. 2012. **Surge Arresters Application and Selection**. [Slides]. : Siemens Energy, Inc.
- [26] McDonald, J. D. F. Darveniza, M. Saha, T. K. "THE DIAGNOSTIC TESTING OF HIGH VOLTAGE SILICON CARBIDE SURGE ARRESTERS" **Proceedings of the Australasian Universities Power Engineering Conference: AUPEC, 2000**. pp. 319-324.
- [27] Norasage Pattanadech 2017. **Condition Monitoring of High Voltage Apparatus**. [Lecture note]. Thailand : Norasage Pattanadech.
- [28] A. Haddad and D. Warne. **Advances in High Voltage Engineering**. London : Institution of Energy and Technology. 2004
- [29] สุขุม พิทยาพิบูลพงศ์ "การวัดลักษณะคุณสมบัติของโครงสร้างนาโนZnO ที่เตรียมโดยกระบวนการขนถ่ายเฟสไอโดยใช้สารผสมZnO/CNTs" "วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2553.
- [30] Bassi, W. and Tatizawa, H. "Early prediction of surge arrester failures by dielectric characterization" **IEEE Electrical Insulation Magazine**. 2016, vol. 32. pp. 35-42.
- [31] Mardira K. P. and Saha, T. K. "Modern electrical diagnostics for metal oxide surge arresters" **IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition**. 2002, vol.2. pp. 672-676.
- [32] Chuayin, C. Zinck, M. Kunakorn, A. and Pattanadech, N. "The Effect of Electrical and Moisture Degradation of Metal Oxide Varistor with Insulation Diagnosis" **2020 8th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)**. 2020. pp. 110-113.
- [33] Kim, Y. S. "Failure Prediction of Metal Oxide Varistor Using Nonlinear Surge Look-up Table Based on Experimental Data" **TRANSACTIONS ON ELECTRICAL AND ELECTRONIC MATERIALS**. 2015. Vol. 16, No. 6. pp. 217-220.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [34] CHRZAN, K. L. WRÓBLEWSKI, Z. "DEGRADATION AND DESTRUCTION OF ZnO VARISTORS CAUSED BY CURRENT PULSES" **International Conference on Advances in Processing, Testing and Application of Dielectric Materials**. 2001. pp. 217-220.
- [35] Boggs, S. Kuang, J. Andoh, I. and Nishiwaki, S. "Increased energy absorption in ZnO arrester elements through control of electrode edge margin" **IEEE Transactions on Power Delivery**. 2000. Vol. 15, no. 2. pp. 562-568.
- [36] HINRICHSSEN, V. REINHARD, M. and RICHTER, B. "ENERGY HANDLING CAPABILITY OF HIGH-VOLTAGE METAL-OXIDE SURGE ARRESTERS PART 1: A CRITICAL REVIEW OF THE STANDARDS" **Cigre' International technical Colloquium**. 2007. pp. 1-11.
- [37] Novizon Malek Z. A. Syafii Ahmad M. H. Aulia and Ulfiah, S. A. "Condition based monitoring of gapless surge arrester using electrical and thermal parameters" **Conference on Innovation in Technology and Engineering Science**. 2019. 1-12.
- [38] Thipprasert, W. and Sritakaew P. "Leakage Currents of Zinc Oxide Surge Arresters in 22 kV Distribution System Using Thermal Image Camera" **Journal of Power and Energy Engineering**. 2012. Vol. 2 pp. 712-717.
- [39] Liu, J., He, J., Hu, J. et al. "Statistical pulse degradation characteristics of grain boundaries in a ZnO varistor based on microcontact measurement" **Journal of the American Ceramic Society** **93**. 2010. pp. 2473-2475.
- [40] Metwally, I. A., Eladawy M. and Feilat E. A. "Online Condition Monitoring of Surge Arresters Based on Third-Harmonic Analysis of Leakage Current" **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**. 2017. Vol. 24, No. 4. pp. 2274-2281.
- [41] Lu, J. Xie, P. Fang, Z. and Hu, J. "Electro-Thermal Modeling of Metal-Oxide Arrester under Power Frequency Applied Voltages" **Energies**. 2018. Vol. 11. pp. 1-13.
- [42] IEC, 2018. **IEC 60099-5:2018 Surge arresters - Part 5: Selection and application recommendations**. International Electrotechnical Commission.






เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ภาคผนวก ก

รายละเอียดคุณสมบัติของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบวงจรสร้างกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่น  
มาตรฐาน 8/20  $\mu$ s

ตารางภาคผนวก ก รายละเอียดคุณสมบัติของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบวงจรกำเนิดกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า

อุปกรณ์	รูปประกอบ	คุณสมบัติ
หม้อแปลงและ อุปกรณ์เรียงกระแส		Rectifier "EMILE HAEFELY & Co., Ltd. BASEL" WO. 538041, 200 kV, 60 mA, Primary voltage 380 V, Input power 30 kVA
ตัวต้านทานชั้่นต์		Impulse current shunt "HAEFELY" WO. 730319, 26.058 m $\Omega$ , Rated voltage 500 V
อุปกรณ์ลดทอน แรงดัน		Impulse voltage divider "HAEFELY" CR3000, 3000 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





<p>ชุดกำเนิดอิมพัลส์ แรงดันและกระแส</p>		<p>Impulse generator “HAEFELY” Series V, 3600 kV, 180 kJ</p>
<p>อุปกรณ์บันทึกค่า และปรับตั้งค่า</p>		<p>Digitizing recorder “DR. STRAUSS” TR-AS 200-12</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### ภาคผนวก ข

รายละเอียดคุณสมบัติของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบวงจรวัดกระแสรั่วไหลของกัปดักเสิร์จ

ตารางภาคผนวก ข รายละเอียดคุณสมบัติของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบวงจรกำเนิดกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า

อุปกรณ์	รูปประกอบ	คุณสมบัติ
หม้อแปลง		Regulating transformer “MWB” THOMA, 300 kVA, 3300/1000 V/V,
โวลต์มิเตอร์อ่านค่าแรงดัน		AC peak voltmeter “HAEFELY” 51
ออสซิลโลสโคป		Digitizing oscilloscope “TEKTRONIX” DP5054
ตัวป้องกันแรงดันเกิน (Blocking impedance)		


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<p>อุปกรณ์ลดทอนแรงดัน</p>		<p>Voltage divider “MWB” CM 1200, 3 stages, 100 pF, Ratio 8000:1</p>
<p>ตัวเก็บประจุมาตรฐาน</p>		<p>Coupling capacitor “TETTEX AG” 3370/50/600</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 
1. C. Chuayin, M. Zinck, A. Kunakorn and N. Pattanadech, "Study of Asymmetrical Leakage Currents of Metal Oxide Surge Arrester due to Multiple Current Impulses," 2020 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM), Tokyo, Japan, 2020, pp. 305-308.

# Proceedings of 2020 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM 2020)

September 13-17, 2020

Virtual web conference, alternative to Waseda University,  
Tokyo, Japan

**Sponsored by:**

IEEJ Technical Committee on Dielectrics and Electrical Insulation

**Technically co-sponsored by:**

IEEE Dielectrics and Electrical Insulation Society

**Co-sponsored by:**

Kagami Memorial Research Institute for Materials Science and Technology, Waseda University

**Supported by:**

JSPS KAKENHI (Grant No.: JP20HP0303)

Support Center for Advanced Telecommunications Technology Research (SCAT), Foundation



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Study of Asymmetrical Leakage Currents of Metal Oxide Surge Arrester due to Multiple Current Impulses

C. Chuayin<sup>1\*</sup>, M. Zinck<sup>2</sup>, A. Kunakorn<sup>1</sup> and N. Pattanadech<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

<sup>2</sup> Paralec Energy Co., Ltd

\*E-mail: chaitwat09@gmail.com

**Abstract** – This paper presents the study of asymmetrical leakage current of metal oxide surge arrester (SA) after being tested with multiple current impulses. The study is made using 2 SAs specimens of 21 kV rated voltage, 5 kA nominal discharge current. The experiment is divided into 4 steps; 10 shots of positive discharge current impulses, reference voltage measurement, 5 shots of negative discharge current impulses and reference voltage measurement. Initial conditions of the SAs are assessed prior to the testing: temperature measurement, 1 mA reference voltage and resistive leakage current at rated voltage. Then, both specimens are applied current lightning impulses at 200% of rated discharge current (10 kA) and the temperature is measured after. The lightning current impulse is 8/20  $\mu$ s waveform and the duration between each impulse is 10s. Prior to the application of multiple current impulses, the difference of resistive current peak amplitude of specimen 1 and 2 were 3% and 0.95% respectively. Following positive current lightning impulses, the value changed to be 71.245% and 72.75% respectively. The specimens were then left to cool down in the room temperature for 1 day. After application of negative current lightning impulses, difference of resistive leakage current of specimen 2 changed to be 1.99%, and specimen 1 broke down after 2 impulses. Asymmetrical leakage current phenomena caused by the impulse current may negatively affect the breakdown characteristic of the SA which should be relevant with the collected charge inside the SA material, however, the opposite polarity of the applied impulse currents may eliminate such problem.

**Keywords:** surge arrester, asymmetrical resistive leakage current, multiple impulses, metal oxide surge arrester

## I. INTRODUCTION

Nowadays, surge arresters are widely used in an electrical power system to protect high voltage equipment against surges or transient overvoltages. There are usually two types of surge arresters. The first type is a surge arrester with spark gaps as components in the arrester. The other type is a surge arrester without spark gaps. In this research, the surge arrester without spark gaps is under investigation. Normally, the surge arrester without spark gaps is composed of the nonlinear resistance material which is a metal oxide element. The discovery of zinc oxide (ZnO) which is a type of the metal oxide leads to a development in ZnO as a component in a surge arrester. The metal oxide consists of granules of zinc oxide with a small amount of other carefully selected metal oxide additives to improve the V-I non-linearity [1]. The metal oxide surge arrester conducts the impulse current due to a transient overvoltage to the ground. However, during a normal power frequency voltage operation, there is, always, a leakage current flowing through the metal oxide surge

arrester. The leakage current is an important characteristic of the metal oxide surge arrester. The leakage current contains two components which are the resistive current component and the capacitive current component. The leakage current has been employed as an indicator for degradation of a surge arrester [2,3]. The degradation monitor techniques use harmonic analysis of the total leakage current to obtain the third harmonic of the resistive current [2,3].

According to IEC 60099-4, a surge arrester has to be tested in many aspects [4]. A residual voltage test is required. In such a test, a lightning impulse current of 8/20  $\mu$ s is applied to the surge arrester, and the voltage at the terminals during current discharge is recorded. During the test, the surge arrester may be applied by the impulse current in multiple times. In practice, when a surge arrester is installed in a power system, there are opportunities which the surge arrester must absorb multiple impulse currents through the operating conditions. L. Bok-Hee and K. Sung-Man did experiments in applying multiple impulse voltages and multiple impulse current to surge arresters [5]. It has been noticed that the waveforms of resistive leakage currents flowing through the metal oxide surge arrester degradation due to the multiple impulse currents have asymmetrical in a peak amplitude between a positive peak and a negative peak [5]. It has been suggested that the degradation of metal oxide (ZnO) has an asymmetrical leakage current, and the bipolar impulse shape should be considered in evaluating the surge arrester deterioration [5,6].

This paper presents studies of an asymmetrical resistive leakage current of metal oxide surge arresters after being applied by multiple impulse currents as a commissioning test. Effects on an asymmetrical peak in the leakage current from both positive impulse currents and negative impulse currents are investigated. The residual voltage measurement is performed under the standard recommendation with multiple impulse currents in both polarities. To separate between the resistive leakage current component and the capacitive leakage current component, the reference voltage measurement is employed. Using mathematical function available in the oscilloscope, the resistive current component of the metal oxide surge arrester can be determined. The asymmetrical characteristics in the resistive leakage current, then, are discussed. During experiments, temperatures at various location along a surge arrester are monitored to prevent the thermal runaway of the surge arrester.

## II. METHODOLOGY

### A. Residual voltage measurement

The purpose of the residual voltage measurement is to obtain the maximum voltage across the terminals of a surge arrester for a specified current waveshape [4]. The test procedures are to inject lightning current impulse to the surge arrester as shown in Fig. 1.

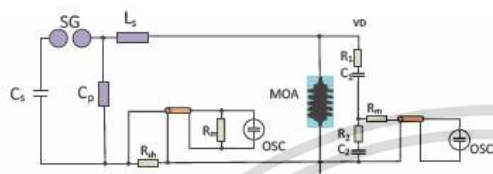


Figure 1. Residual voltage measurement circuit.

Where:  $C_s$  is series capacitor  
 SG is spark gap  
 $C_p$  is parallel capacitor  
 $L_s$  is series inductor  
 $R_{sh}$  is shunt resistor  
 VD is RC voltage divider  
 osc is oscilloscope  
 $R_m$  is matching impedance  
 MOA is metal oxide surge arrester

### B. Reference voltage measurement

The aim of the test is to measure the resistive leakage current. The reference voltage is defined as the RMS value of the power-frequency voltage being applied to the arrester in order to obtain the 1mA reference current [4]. The method is similar to resistive leakage current measurement, the different is that the resistive leakage current measurement is measured at rated voltage of SA. Therefore, the two values are obtained from the same test circuit. The test circuit is as shown in Fig. 2.

In order to extract the resistive leakage current, the standard [7] introduces a few methods such as the third harmonic measurement or the power loss measurement using a voltage signal as a reference. In this research, the capacitive compensation method was used. This is the purple dashed line block as shown in Fig. 5. The balanced bridge connection is used for adjusting an amplitude of the capacitive current. The resistive leakage current of the surge arrester is achieved by subtracting the capacitive current component using mathematical function available on the oscilloscope.

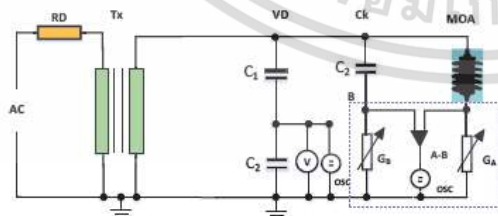


Figure 2. Reference voltage measurement circuit.

Where: TX is transformer  
 RD is water resistor  
 VD is voltage divider  
 V is voltmeter

osc is oscilloscope  
 Ck is coupling capacitor  
 MOA is metal oxide surge arrester

### C. Temperature measurement

Temperature measurement was performed on surge arrester under investigation. Temperature values at three locations along the surface of the surge arrester were collected using infrared thermometers. These temperature values were used to observe whether there was a thermal runaway effect of the surge arrester during the experiments. The temperature measurement locations were at the top, the middle and the bottom of the surge arrester as shown in Fig. 3.

### D. Test specimens

The series of experiments were carried out on commercial distribution class metal oxide surge arresters. The specifications and electrical properties of the specimens are tabulated in Table I.

TABLE I. MECHANICAL AND ELECTRICAL SPECIFICATIONS OF SURGE ARRESTER SPECIMENS

Parameters	Value
Rated voltage	21 kV
Maximum continuous voltage	17 kV
Rated discharge current	5 kA
Residual voltage	70 kV
Total creepage distance	680 mm

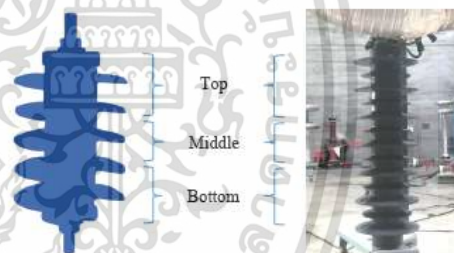


Figure 3. Temperature measurement's positions.

## III. EXPERIMENT

The first experiment was carried out using the voltage reference measurement circuit to obtain the resistive leakage current component of surge arrester samples. An asymmetrical characteristic in the leakage current is calculated by the difference percentage between a positive peak and a negative peak of the leakage current. Results are shown in Table II, as well as in Fig. 4-5.

TABLE II. ELECTRICAL PROPERTIES OF SA BEFORE APPLYING IMPULSES

Parameters	Sample 1	Sample 2
Temperature[Top,middle, bottom] [°C]	31.1, 32.3, 31.4	31.9, 32.1, 32
Resistive leakage current @ 21 kV [positive/negative peak] [μA]	184.4, -213.6	224.7, -250.2
+/- Difference percentage [%]	13.67	10.19
1mA reference voltage [positive/negative peak]	33.13 kV 1.075 mA, -1.119 mA	32.85 kV 0.945 mA, -0.954 mA
+/- Difference percentage [%]	1.20	0.94

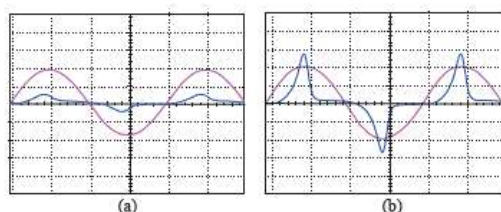


Figure 4. Leakage current at 21 kV voltage (a) and at reference voltage (b) of sample 1.

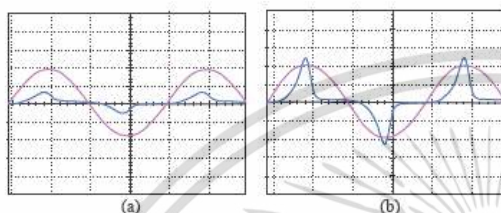


Figure 5. Resistive leakage current at 21 kV voltage (a) and at reference voltage (b) of sample 2.

The second experiment was carried out using the residual voltage measurement circuit. The samples were applied by 8/20  $\mu$ s positive impulse currents 10 times. After injecting one impulse current waveshape, the sample was left for 10 s before applying the following impulse current. An example of a residual voltage is shown in Fig. 6.

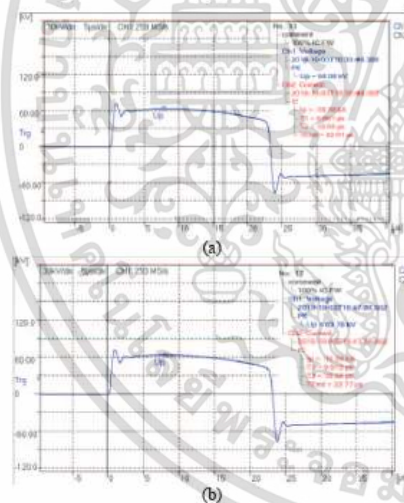


Figure 6. Residual voltage of sample 1 (a) and sample 2 (b).

The third experiment was to measure the resistive leakage current component of surge arrester samples using the voltage reference measurement circuit. This is to observe the change in the resistive leakage current of the sample after being stressed by positive impulse currents. Results are shown in Table III. as well as in Fig. 7 - 8.

After being stressed by positive impulse currents, the surge arrester sample was left for one day at the ambient temperature for heat dissipation from the sample. The fourth experiment was performed to observe the resistive leakage current. It was found that the asymmetrical characteristics in the resistive leakage current remained. Results are shown in Table IV.

TABLE III. ELECTRICAL PROPERTIES OF SA AFTER BEING STRESSED BY 10-POSITIVE IMPULSE CURRENTS

Parameters	Sample 1	Sample 2
Temperature[Top,middle, bottom] [°C]	48, 111.4, 75.7	66.3, 90.9, 45.9
Resistive leakage current @21 kV [positive/negative peak][mA]	0.671, -2.337	0.713, -2.618
+/- Different percentage [%]	71.25	72.73
1mA reference voltage [positive/negative peak]	27.743 kV 0.430mA, -1.019 mA	28.75 kV 0.447 mA, -1.147 mA
+/- Different percentage [%]	57.80	60.94

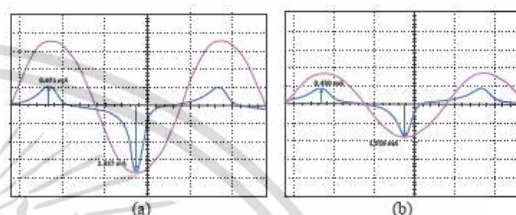


Figure 7. Resistive leakage current at 21 kV voltage (a) and at reference voltage (b) of sample 1 (after multiple positive impulses currents injection).

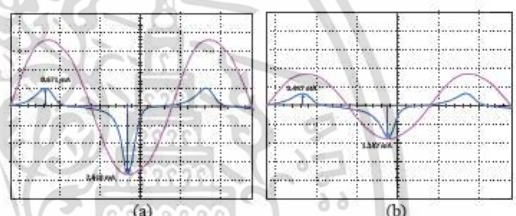
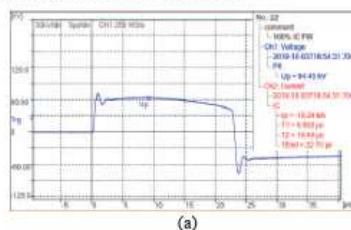


Figure 8. Resistive leakage current at 21 kV voltage (a) and at 1 mA reference voltage (b) of sample 2 after multiple positive impulses application.

TABLE IV. ELECTRICAL PROPERTIES OF SA AFTER BEING STRESSED BY POSITIVE IMPULSE CURRENTS AND BEING LEFT TO COOL DOWN FOR ONE DAY

Parameters	Sample 1	Sample 2
Temperature[Top,middle, bottom] [°C]	32.3, 33.6, 31.9	31.8, 31.6, 31.3
Resistive leakage current @21 kV [positive/negative peak] [mA]	0.361, -0.867	0.444, -1.439
+/- Different percentage [%]	58.34	69.15
1mA reference voltage [positive/negative peak]	21.1 kV 0.396 mA, -1.113 mA	21.0kV 0.394 mA, -1.04 mA
+/- Different percentage [%]	64.33	62.12

The fifth experiment was carried out using the residual voltage measurement circuit. The samples were applied by 8/20  $\mu$ s negative impulse currents 5 times. After injecting one impulse current waveshape, the two samples were left for 10 s before applying the following impulse current. An example of a residual voltage is shown in Fig. 9.



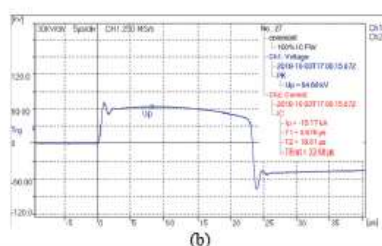


Figure 9. Residual voltage of sample 1 (a) and sample 2 (b).

The sixth experiment was to measure the resistive leakage current component of surge arrester samples using the voltage reference measurement circuit. This is to observe the change in the resistive leakage current of the sample after being stressed by negative impulse currents. Results are shown in Table V. as well as in Fig. 10.

TABLE V. ELECTRICAL PROPERTIES OF SA AFTER APPLYING TAIN OF NEGATIVE IMPULSE

Parameters	Sample 1	Sample 2
Temperature[Top,middle, bottom] [°C]	38, 43, 40	45, 52, 31
Resistive leakage current @21 kV [positive/negative peak] [mA]	N/A	1.184, -1.208
+/- Different percentage [%]	N/A	1.99
1mA reference voltage [positive/negative peak]	18 kV 1.042 mA, -1.062 mA	20.7 kV 0.995 mA, -1.025 mA
+/- Different percentage [%]	1.92	2.83

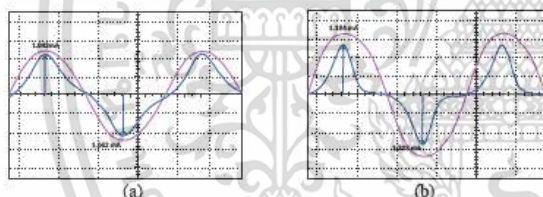


Figure 10. Leakage current at 21kV of sample 1 (a) and sample 2 (b) (after negative impulse currents injection).

During the fifth experiment, sample 1 exploded after applying 2-negative impulses shown in Fig. 11. The leakage current at 21kV could not be measured as partial discharge appeared at 18.54 kV and will harm the measuring unit.



Figure 11. Break down location of sample 1 after applying 2-negative current impulses injection.

From experimental results, it is found that the waveforms of the resistive leakage currents flowing through the surge arrester sample are independent of the polarity of the power frequency applied voltage. A positive peak and a negative peak of the leakage currents are almost symmetrical.

However, after applying multiple positive impulses to the samples, it is shown that the resistive leakage current waveforms become asymmetry. The negative peak of the resistive leakage current has a higher amplitude than a positive peak. After being left for one day in order to get heat dissipation, it is noticed that both surge arrester samples still have asymmetry. When applying multiple negative impulse currents to the surge arrester sample, it is noted that the asymmetrical characteristics of the resistive leakage currents disappear. Sample 1 exploded during negative impulses application. The temperatures after the explosion were still low. This confirms that, during experiments, there are no thermal runaway effects on the surge arrester sample.

#### IV. CONCLUSION

Metal oxide surge arrester leakage current has been discussed. There are two components of the leakage current which are resistive and capacitive component. In this paper, the resistive leakage current has been measured. Effects of multiple impulse currents injected to metal surge arrester samples have been concerned. It has been found that the asymmetry has appeared in the resistive leakage current due to the effects of the multiple impulse currents. The asymmetry has resulted in unequal amplitude of the positive peak and the negative peak. It has been shown that when multiple impulse currents in opposite polarity are injected to the surge arresters, the asymmetry has decreased, and the resistive leakage current has returned to the symmetry in the positive and negative peak amplitudes. The asymmetrical characteristic should be taken into account in a surge arrester monitoring process.


A hypothesis can be formulated that the asymmetrical behavior is relevant with collected charges inside the surge arrester material. The charges are subtracted when applied with opposite polarity impulse and the leakage current became symmetry. Moreover, the number of impulses applied affect to the asymmetrical behavior which the 5 times of negative impulses can change the waveform to symmetry.

#### ACKNOWLEDGMENT

The authors gratefully acknowledge Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT) for supporting all testing equipment in a laboratory. In addition, the authors acknowledge Paralec energy Co., Ltd and Streamer international AG for providing the sample of a surge arrester.

#### REFERENCES

- [1] E. Kuffel, W.S. Zaengl and J. Kuffel "High Voltage Engineering Fundamentals" 2<sup>nd</sup> edition, 2000.
- [2] S.R.Naidu and K.D.Srivastava "The validity of circuits for measuring the resistive leakage current of zinc oxide arresters" 5th international symposium on High voltage engineering, August 1987.
- [3] S. Shirakawa, F.Endo, H.Kitajima, S.Kobayashi, K.Goto and M.Sakai "Maintenance of surge arrester by portable arrester leakage current detector", IEEE Transactions on Power Delivery, July1988, pp. 998-1003.
- [4] IEC 60099-4, "Surge arresters - Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems", 2014.
- [5] L. Bok-Hee and K. Sung-Man, "Properties of ZnO varistor blocks under multiple lightning impulse voltages", Current Applied Physics, Vol. 6, No. 5, September 2006, pp. 844-851.
- [6] H. Tarcicius, S. Tunggul, Tumiran and B. Berahim, "The damage of ZnO arrester block due to multiple impulse currents", TELKOMNIKA, Vol.9, No.1., April 2011, pp. 171-182.
- [7] IEC 60099-5, "Surge arresters - Part 5: Selection and application recommendations", 2018.



2. C. Chuayin, M. Zinck, A. Kunakorn and N. Pattanadech, "The Effect of Electrical and Moisture Degradation of Metal Oxide Varistor with Insulation Diagnosis," 2020 8th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Phuket, 2020, pp. 110-113

**Proceeding Book**

**CMD 2020**  
International Conference on  
Condition Monitoring and Diagnosis

**The 8<sup>th</sup> International Conference  
on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD 2020)**  
October 25–28, 2020

Electrical Engineering Dept., Faculty of Engineering,  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# The Effect of Electrical and Moisture Degradation of Metal Oxide Varistor with Insulation Diagnosis

Chaitawat Chuayin  
Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of  
Technology Ladkrabang, Thailand  
Chaitwat09@gmail.com

Matthieu Zinck  
Paralec Energy Co., Ltd  
Thailand  
matthieu@paralec.com

Anantawat Kunakorn  
Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of  
Technology Ladkrabang, Thailand

Norasage Pattanadech  
Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of  
Technology Ladkrabang, Thailand

**Abstract**—Condition based monitoring of surge arresters (SA) has become a primary concern to ensure power supply quality on medium and high voltage networks. Understanding of SA behavior helps forecast their failure. This paper presents the analysis of dielectric response and conductivity of Metal Oxide Varistor (MOV) under degradation factors (normal ageing, impulse ageing and moisture ageing) using Polarization and Depolarization techniques. Normal ageing is represented by stressing the MOV with 115°C temperature. For impulse ageing, 20, 40, 60 and 100 shots of positive and negative polarity of standard lightning impulses current were applied. Moisture ageing was performed by soaking MOV under 115°C temperature for 12 hours representing wet condition and the soaked blocks were left at room temperature for 24 hours representing dry condition. Polarization and Depolarization Current (PDC) was measured after each ageing step. Resistivity, conductivity and polarization index were interpreted for insulation diagnosis. The experiments were taken on the MOV with rated voltage 3 kV and 5kA-nominal discharge. The importance of nondestructive electrical diagnostics based on polarization methods is validated by test results and is highlighted in detail in this paper. Finally, the results of different ageing factors were compared and discussed.

**Keywords**—metal oxide surge arrester, degradation, polarization and depolarization current, insulation diagnosis

## I. INTRODUCTION

Metal Oxide Surge Arrester is an important equipment for electrical systems, which limits the overvoltage (whether lightning or transient over voltage) in the system to prevent damage to electrical equipment. To ensure the stability and reliability of the electrical power distribution, the metal oxide surge arrester is still necessary in the electrical system. Today, metal oxide surge arresters are widely used for different purposes, such as protection of important equipment (transformers, riser poles or transmission lines) or overvoltage protection.

Normally, metal oxide surge arresters can be damaged any time, from overvoltages that exceed their own limits, ferro-resonance, partial discharge, lightning currents which greater than energy capability or moisture ingress. Such factors are presented in the paper "Surge Arrester Faults and Their Causes at EThekwini Electricity" [1].

In order to reduce the damage of metal oxide surge arrester and increase reliability of electrical systems, monitoring of surge arrester conditions is necessary. Not only can the surge arrester monitoring provide the present conditions, but it may also predict the life expectancy of surge arresters. Moreover, prompt maintenance can ensure that the electrical system is consistently protected. The metal oxide surge arresters mainly consist of metal oxide blocks, insulation housing and

electrodes as shown in Fig. 1. The block behavior is nonlinear resistance. In other words, at the operating voltage, the block will not conduct the current, but when overvoltage occurs in the system, the block will start discharging the current and leading that current to ground.

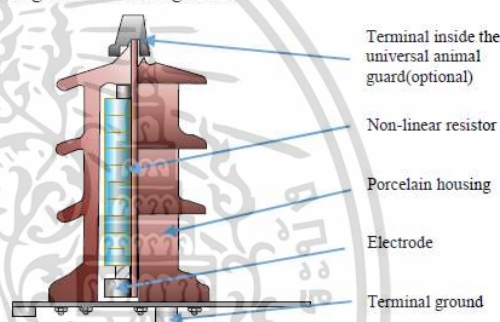


Fig. 1. Metal Oxide surge arrester structure.

Currently, surge arrester monitoring has been studied extensively, including leakage current measurement, energy capability monitoring or surge counter monitoring. In this research, the study is based on dielectric response analysis of surge arresters with Polarization and Depolarization Current (PDC) measurement [2-3]. Ageing factors will influence the changing of material properties which lead to the changing of material conductivity and resistivity, as well as its polarization and depolarization current behavior.

Based on the current measurement, analysis of surge arrester conductivity, resistivity and dielectric response was done. The tested metal oxide blocks were degraded by positive lightning currents, negative lightning currents and moisture. The analysis between normal, moisture and impulse current degradation are compared and being presented in this paper.

## II. EXPERIMENTS

### A. PDC Measurement

In this paper, the PDC measurement was performed by using a commercial IMOD PDC analyzer. For PDC measurement, a step DC voltage of magnitude 100V will be applied to test object for 1100s. Firstly, the switch  $S_1$  is turned on, the polarization (so called "charging current") passing through the test object is then measured. After polarization process was completed, the switch  $S_2$  is turned on and the depolarization current (so called "discharging current") with the same magnitude in the opposite direction is measured. The depolarization current continuously decreases until the steady

state or completed depolarization process. The PDC circuit arrangement and PDC property are illustrated in Fig. 2.

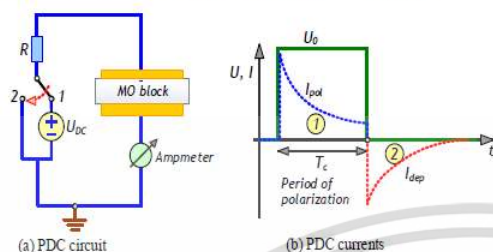


Fig. 2. Principle of polarization and depolarization current measurements.

PDC measurements consist of 3 steps to perform better useful data as follows:

- Initial measurement: This step will measure the remaining charge (in terms of remaining current) in the test object until low enough to start the testing. The initial measurement also gives the initial condition of the test object.
- Control measurement: A short period (e.g., 5 s) of energizing time is done. The aim of this step is to verify the prompt circuit arrangement and the current magnitude. Then the depolarization current is measured until the remaining current level.
- Main measurement: After the test circuit was verified and the remaining current level was confirmed, the main measurement will then be performed.

#### B. Test Specimens

The commercial metal oxide block was tested. The specifications of the block are shown in Table 1.

TABLE I. METAL OXIDE BLOCK SPECIFICATIONS

Parameter	Value
Rated voltage	3kV
Maximum continuous voltage	2.55 kV
Rated discharge current	5 kA
Reference voltage at 1mA (DC), Uref (kVpeak)	4.4-4.8

The electrical parameters of new blocks are shown in Table 2.

TABLE II. PDC MEASUREMENT OF NEW METAL OXIDE BLOCKS

Number	Parameters			
	Resistance [ $\Omega$ ]		Capacitance	PI
Pol.	Depol.			
1	6.00E+10	6.14E+10	1.63E-09	1.13
2	6.13E+10	6.06E+12	1.72E-09	1.17
3	6.50E+10	6.42E+10	1.84E-09	1.15

#### C. Test Procedures

Three conditions of metal oxide blocks were simulated as described below.

- Normal ageing condition.

The IEC 6099-4, Annex K, recommended the accelerated ageing tested under Arrhenius law given a specific time of

115°C heating temperature [4]. The accelerated ageing rate is approximately given by (1).

$$AF_T = 2.5^{\left(\frac{\Delta T}{10}\right)} \quad (1)$$

Where  $\Delta T$  is the different temperature between ambient temperature and heated temperature.

Moreover, the extrapolated ageing time obtained from Arrhenius law has been studied and published in [5]. The extrapolated ageing time is obtained from (2).

$$t_{eq} = t_{test} \times AF_T \quad (2)$$

Where  $t_{eq}$  is the extrapolated ageing time expressed in hours,  $t_{test}$  is testing time during the accelerated ageing test.

Three blocks were stressed with a 115°C heating temperature in the oven for 6, 12, 18, 24 and 36 hours as shown in Fig. 3. The PDC measurements were performed and recorded after each heating process.



Fig. 3. Metal oxide blocks were heated in the oven.

- Impulse ageing condition.

The six metal oxide blocks were divided in to 2 groups i.e., positive lightning current impulse application and negative lightning impulse application. The test circuit is presented in Fig. 4. The lightning impulse current was measured and recorded by using oscilloscope via Rogowski coil.

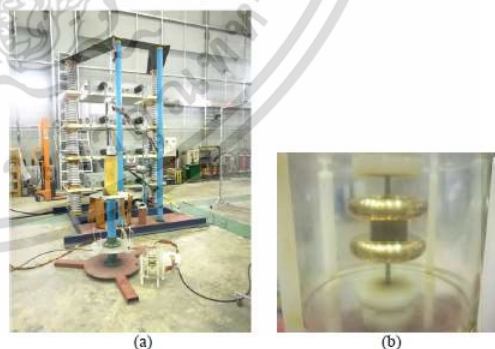


Fig. 4. Impulse current application test circuit (a) and the test object (b).

The first group's experiment was carried out using 20, 40, 60 and 100 shots of 5-kA positive lightning current impulse application. The second group's experiment was carried out using 20, 40, 60 and 100 shots of 5-kA negative lightning current impulse application. The PDC measurement were performed after each impulse application.

- Moisture ageing conditions.

The moisture ageing process was carried out by soaking the metal oxide blocks in the water under 115°C temperature for 12 hours in wet condition, and then the blocks were left at room temperature for 24 hours to represent natural dry cooling. The PDC measurement was performed after each soaking process.

### III. TEST RESULTS

The measured polarization and depolarization currents were plotted in a log-log scale by applying a direct voltage of 100V for 1100s. The PDC test results are tabulated in Tables 3-6 according to the ageing condition. The resistivity and dielectric response were calculated based on polarization and depolarization current.

#### A. Normal Ageing Condition

The depolarization current curve of the blocks in any stressed hours is illustrated in Fig. 5. The conductivities do not change significantly, neither does polarization index.

TABLE III. PDC TEST RESULT OF METAL OXIDE BLOCKS AFTER BEING STRESSED BY 115°C TEMPERATURE

Stressed hours		Parameters			
		Resistance [ $\Omega$ ]		Apparent conduction current [A]	Polarization index
		Pol. <sup>a</sup>	Depol. <sup>b</sup>		
6 hr	M1	5.75E+10	5.60E+10	1.78E-09	1.16
	M2	5.24E+10	5.16E+10	1.94E-09	1.13
	M3	6.05E+10	5.95E+10	1.68E-09	1.17
12 hr	M1	5.49E+10	5.40E+10	1.85E-09	1.13
	M2	6.02E+10	5.90E+10	1.69E-09	1.18
	M3	7.84E+10	7.67E+10	1.30E-09	1.21
18 hr	M1	6.54E+10	6.45E+10	1.55E-09	1.17
	M2	7.40E+10	7.23E+10	1.38E-09	1.18
	M3	6.46E+10	6.33E+10	1.58E-09	1.18
24 hr	M1	5.80E+10	4.47E+10	2.24E-09	1.21
	M2	5.44E+10	3.84E+10	2.60E-09	1.11
	M3	5.12E+10	4.15E+10	2.41E-09	1.13
36 hr	M1	5.80E+10	4.67E+10	2.14E-09	1.21
	M2	5.44E+10	5.33E+10	1.88E-09	1.11
	M3	5.12E+10	5.06E+10	1.98E-09	1.13

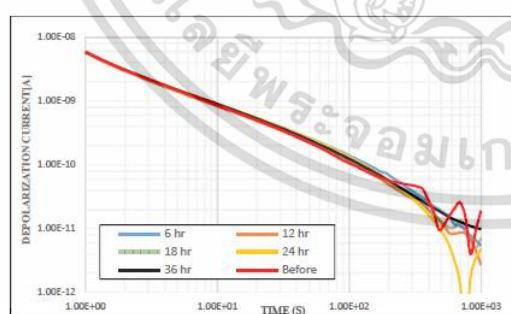


Fig. 5. The depolarization current curve of sample 1 under normal ageing condition.

#### B. Impulse Ageing Condition

Impulse ageing results were divided into 2 parts i.e., positive impulse ageing and negative impulse ageing. The conduction currents increased according to the number of impulse application shots. On the other hand, polarization indexes were quite the same compared to the new sample.

TABLE IV. PDC TEST RESULTS OF METAL OXIDE BLOCKS AFTER BEING STRESSED BY POSITIVE IMPULSE CURRENTS

Number of impulses		Parameters			
		Resistance [ $\Omega$ ]		Apparent conduction current [A]	Polarization index
		Pol. <sup>a</sup>	Depol. <sup>b</sup>		
20 shot	M1	3.82E+10	3.80E+10	2.63E-09	1.09
	M2	5.89E+10	5.58E+10	1.79E-09	1.2
	M3	5.03E+10	4.97E+10	2.02E-09	1.13
40 shot	M1	3.75E+10	3.69E+10	2.72E-09	1.13
	M2	5.55E+10	5.55E+10	1.80E-09	1.22
	M3	4.70E+10	4.67E+10	2.14E-09	1.19
60 shot	M1	3.34E+10	3.24E+10	3.09E-09	1.11
	M2	5.35E+10	5.19E+10	1.93E-09	1.23
	M3	3.83E+10	3.43E+10	2.91E-09	1.15
100 shot	M1	3.02E+10	2.99E+10	3.35E-09	1.12
	M2	3.23E+10	3.34E+10	4.56E-09	1.07
	M3	3.75E+10	3.67E+10	2.05E-08	1.2

<sup>a</sup> Polarization current <sup>b</sup> Depolarization current

TABLE V. PDC TEST RESULTS OF METAL OXIDE BLOCKS AFTER BEING STRESSED BY NEGATIVE IMPULSE CURRENTS

Number of impulses		Parameters			
		Resistance [ $\Omega$ ]		Apparent conduction current [A]	Polarization index
		Pol. <sup>a</sup>	Depol. <sup>b</sup>		
20 shot	M1	4.96E+10	4.93E+10	2.03E-09	1.11
	M2	4.54E+10	4.54E+10	2.20E-09	1.1
	M3	4.76E+10	4.71E+10	2.13E-09	1.11
40 shot	M1	4.06E+10	4.01E+10	2.03E-09	1.17
	M2	4.96E+10	4.93E+10	2.03E-09	1.18
	M3	5.68E+10	5.55E+10	1.80E-09	1.19
60 shot	M1	4.21E+10	4.06E+10	2.46E-09	1.17
	M2	4.22E+10	4.11E+10	2.44E-09	1.17
	M3	4.26E+10	4.34E+10	2.31E-09	1.24
100 shot	M1	3.85E+10	3.87E+10	2.58E-09	1.16
	M2	3.67E+10	3.66E+10	2.73E-09	1.18
	M3	2.93E+10	2.81E+10	3.55E-09	1.03

<sup>a</sup> Polarization current <sup>b</sup> Depolarization current

After 40 shots of impulses application, cracking was observed on metal oxide blocks surface as presented in Fig. 6.



Fig. 6. Cracking on metaloxide blocks surface after being 40 shots (a) and 100 shots of lightning current impulses.

Figs. 7 and 8 demonstrate the depolarization curve measured by PDC analyzer of sample 1 after stressed by positive impulses and negative impulses, respectively.

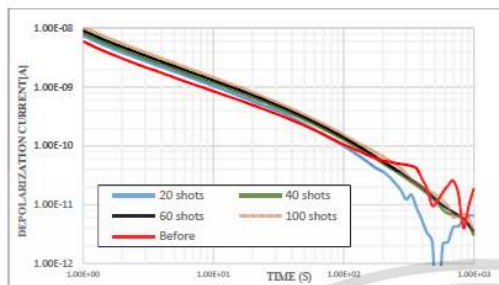


Fig. 7. The depolarization current curve of sample 1 under positive impulse ageing condition.

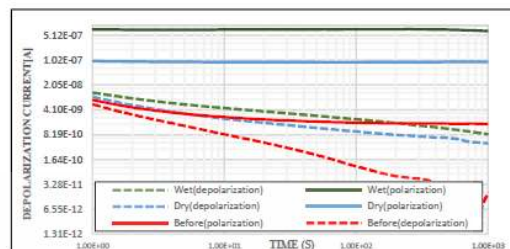


Fig. 10. The PDC curve of sample 1 under moisture ageing condition.

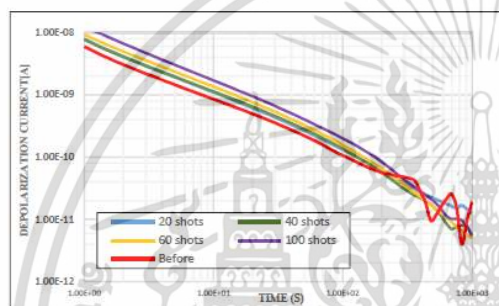


Fig. 8. The depolarization current curve of sample 1 under negative impulse ageing condition.

C. Moisture Ageing Condition

After soaking the metal oxide blocks in the water under 115°C temperature, the blocks were then performed PDC measurement. As visual inspection, after 12 hours of soaking, the ingressive moisture was observed inside the blocks as shown in Fig. 9.

TABLE VI PDC TEST RESULT OF METAL OXIDE BLOCKS AFTER BEING STRESSED BY MOISTURE AGEING

Soaking hours		Parameters			
		Resistance [Ω]		Apparent conduction current [A]	Polarization index
		Pol. <sup>a</sup>	Depol. <sup>b</sup>		
Wet	M1	1.39E+08	1.48E+08	6.76E-07	1.03
	M2	8.32E+08	8.17E+08	1.23E-07	1.13
	M3	1.51E+10	1.26E+10	7.93E-09	1.2
Dry	M1	1.11E+09	1.09E+09	9.13E-08	0.98
	M2	6.04E+09	5.85E+09	1.71E-08	0.98
	M3	4.45E+09	4.15E+09	2.41E-08	0.91

<sup>a</sup> Polarization current      <sup>b</sup> Depolarization current



Fig. 9. Moisture ingressive observation on metal oxide block surface.

Compared to the new blocks, the polarization index of metal oxide blocks under dry condition decreased.

IV. CONCLUSIONS

Following the test results, for the normal ageing condition, compared to the new samples, the conduction current did not change significantly. On the other hand, for impulse current ageing condition, the conduction current increased according to the number of impulse applications for both negative and positive polarity. However, there are some differences between the polarity effects, i.e., the positive impulse current can increase the conduction current dominantly compare to negative impulses. Besides, the conduction current of moisture strongly increased from the beginning. Although, the samples were left to dry the moisture, the conduction current was still higher. Consideration the PDC curve, depolarization curves of wet and dry conditions are the same level as the new samples. In contrast, the polarization current became much higher showing that, for moisture ageing, the insulation properties were the same but, the conductivity increased. Moreover, the relationship between of increase of conduction current and year of normal ageing, positive and negative impulse current ageing is shown in Fig. 11.

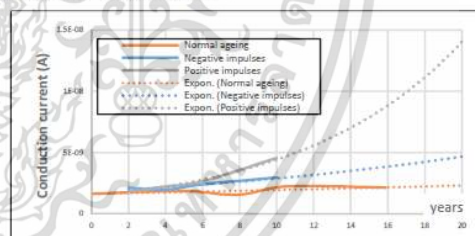


Fig. 11. Comparison ageing acceleration curve between 3 ageing factors.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors acknowledge Paralec energy Co., Ltd and Streamer international AG for providing the samples.

REFERENCES

- [1] M. Gumedde and G. Frederick d'Almaine, Surge Arrester Faults and Their Causes at EThekweni Electricity, International Journal of Electrical Energy, Vol. 2, No. 1, pp. 39-44, March 2014.
- [2] Y. Yan, Z. Li, H. Yu, D. Dang and Z. Liu, An Online Leakage Current Monitoring System of MOV used in Series Capacitor Compensation, 2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON), Guangzhou, 2018, pp. 3541-3546.
- [3] L. Montanes, M. Garcia-Gracia, M. Sanz and M. A. Garcia, An improvement for the selection of surge arresters based on the evaluation of the failure probability, in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 17, no. 1, pp. 123-128, Jan. 2002.
- [4] IEC 60099-4, "Surge arresters - Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems," 2014.
- [5] D. A. Silva et al., Polymer surge arresters: Degradation versus electrical performance, 2012 IEEE Electrical Power and Energy Conference, London, ON, pp. 63-68, 2012.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายชัยวัช ช่วยอินทร์
วัน เดือน ปีเกิด	9 เมษายน 2539 ที่ตรัง
ที่อยู่	1/31 หมู่บ้านศรีตรัง 1 ถ.ตรัง-ปะเหลียน ตำบลโคกหล่อ อำเภอเมือง จังหวัดตรัง 92000
ประวัติการศึกษา	2561 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า (เกียรตินิยมอันดับ2) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1) อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง 2) กักตักเสิร์จและการวิเคราะห์การเสื่อมสภาพ 3) การออกแบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้านการป้องกันฟ้าผ่าของสายส่งไฟฟ้า
ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย	
พ.ศ.2561	- งานวิจัยคุณลักษณะการเบรกดาวนของระบบจำลองท่อส่งไฟฟ้าฉนวนก๊าซ (GIL) กับผลของตำแหน่งวัตถุลอยในระบบ, งานประชุมวิชาการ ISLH2018 กรุงเทพฯ - งานวิจัยคุณลักษณะการเบรกดาวนและการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของอุปกรณ์ระบบฉนวนก๊าซภายใต้สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอเนื่องจากผลของวัตถุลอย, งานประชุมวิชาการ ECTI-CON2018 จังหวัดเชียงราย
พ.ศ.2561	โครงการฝึกอบรมด้านการวิเคราะห์ ออกแบบ และจำลองโมเดลเพื่อคำนวณและปรับปรุงประสิทธิภาพของสายส่งไฟฟ้าต่อการป้องกันฟ้าผ่า ณ ประเทศสวิตเซอร์แลนด์, บริษัทสตรีมเมอร์จำกัด (Streamer international AG)
พ.ศ.2561-ปัจจุบัน	ทุนการศึกษาและวิจัยเรื่องการวิเคราะห์การเสื่อมสภาพของกักตักเสิร์จและกระแสรั่วไหลไม่สมมาตร บริษัทพาราเล็คเอ็นเนอร์จี้ (Paralec Energy Co., Ltd) - นักศึกษาวิจัยและพัฒนาองค์ความรู้และผลิตภัณฑ์ - ผลงานการออกแบบและประกอบสร้างต้นแบบอุปกรณ์ที่ใช้มอเตอร์การเสื่อมสภาพของกักตักเสิร์จ
พ.ศ.2563	- งานวิจัยการศึกษากระแสรั่วไหลที่ไม่สมมาตรของกักตักเสิร์จเนื่องจากการได้รับกระแสอิมพัลส์แบบต่อเนื่อง, งานประชุมวิชาการ ISEIM2020 โตเกียว, ญี่ปุ่น - งานวิจัยการศึกษาการวิเคราะห์ฉนวนของการเสื่อมสภาพของตัวต้านทานวาริสเตอร์ทางไฟฟ้าและความชื้น, งานประชุมวิชาการ CMD2020 กรุงเทพฯ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้